

**INFLUÊNCIA DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO APLICADO COMO MATERIAL DE COBERTURA DE
ATERRO SANITÁRIO NA QUALIDADE DO LIXIVIADO**

TÂNIA TSIVITA SEBASTIÃO MABOTE

Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior

2012/1

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

TÂNIA TSIVITA SEBASTIÃO MABOTE

**INFLUÊNCIA DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO APLICADO COMO MATERIAL DE COBERTURA DE
ATERRO SANITÁRIO NA QUALIDADE DO LIXIVIADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e
Ambiental, da Universidade
Federal de Santa Catarina, como
requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Armando
Borges de Castilhos Junior

Co-Orientador: Msc. Francisco
José Guedes Pimentel

**FLORIANÓPOLIS
2012**

TÂNIA TSIVITA SEBASTIÃO MABOTE

**INFLUÊNCIA DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO APLICADO COMO MATERIAL DE COBERTURA DE
ATERRO SANITÁRIO NA QUALIDADE DO LIXIVIADO**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado para obtenção do Grau de Bacharel na área de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 02 de julho de 2012

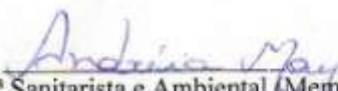
BANCA EXAMINADORA:



Armando Borges de Castilhos Junior, Prof. (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina



Elivete Carmen Clemente Priun, Prof.ª Dr.ª (Membro da Banca)
Universidade Federal de Santa Catarina



Andréia May, Eng.ª Sanitarista e Ambiental (Membro da Banca)
Universidade Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho à minha mãe
Cecília Dequene Mavale, ao meu irmão
Sebastião Marcos Mabote Júnior, meus
incentivadores e maior inspiração em
tudo que faço.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por estar sempre em meus caminhos, me dando sua incomparável força.

À minha mãe, que mesmo estando longe, não me deixou enfraquecer, dando-me estímulo e apoio para concluir o trabalho.

Ao meu querido irmão Sebastião Mabote Júnior que mesmo distante se fez presente em todos os momentos.

Ao Professor Armando Borges de Castilhos Júnior, orientador, agradeço pela atenção e confiança em mim depositada. Seus conhecimentos e incentivos foram fundamentais para a concretização deste projeto.

Ao professor Dr. Paulo Belli Filho, coordenador do Projeto que deu origem a esta pesquisa.

Ao co-orientador Francisco José Guedes Pimentel, muito obrigada pelo apoio, cobranças, dinamismo e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores do Departamento do Curso, que possibilitaram refletir sobre o curso como um todo.

À FAPESC e à CASAN pelo financiamento da pesquisa.

À toda equipe do LARESO e LIMA pelo apoio nas análises laboratoriais.

Aos meus colegas da turma pela convivência durante o curso, especialmente aos colegas Ézio Almir Duarte, Sara Meireles, Amanda Carvalho, Quintino Nhaga.

À toda equipe do LARESO e LIMA pelo apoio nas análises laboratoriais.

À todos que contribuíram de forma direta e indiretamente para o meu crescimento estudantil.

RESUMO

Um dos desafios das empresas de saneamento é encontrar técnicas alternativas para o gerenciamento do lodo das estações de tratamento de esgoto, pois é uma atividade de alta complexidade e alto custo. Dentre outras alternativas, o lodo de ETE pode ser aproveitado como material de cobertura de aterros sanitários quando este não atinge os padrões de qualidade exigidos para reciclagem agrícola. Por outro lado, as camadas de cobertura de aterro sanitário garantem condições de segurança de um aterro sanitário por possuírem a capacidade de minimizar a infiltração de água na massa de resíduos para evitar a formação de lixiviados e mitigar os impactos decorrentes da exposição deste material ao ambiente. Deste modo, este estudo procurou investigar os efeitos da utilização do lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE)-Insular nas características do lixiviado, ao ser aproveitado como material de cobertura de aterros sanitários. O referido estudo consistiu no monitoramento do lixiviado gerado nas células experimentais preenchidas com resíduos sólidos urbanos e diferentes materiais de cobertura com diferentes materiais de cobertura, durante 46 semanas. Uma célula referência continha cobertura de solo argiloso (C1), oriundo de jazida de aterro; outra célula (C2), uma mistura de solo com lodo estabilizado; e uma terceira célula (C3) possuía apenas lodo estabilizado em sua camada de cobertura. A metodologia experimental da pesquisa também envolveu a caracterização do lodo da estação de tratamento de esgoto; e a relação dos dados pluviométricos, fornecidos pelo Laboratório de Energia Solar da UFSC (LEPTEN/LABSOLAR). Posteriormente, foi realizada a análise estatística dos dados que enfoca a variabilidade das características do lixiviado gerado nas células em função das camadas de cobertura testadas. Os resultados mostraram que a célula C2 (solo:lodo 30%) apresentou maiores médias gerais de pH, alcalinidade, DQO, N-NO_2^- , N-NO_3^- , P, N-NH_3 , sólidos (ST,SV,SF), Cu e Zn. No entanto, os testes estatísticos comprovaram diferença estatisticamente significativa entre as células C2(solo+lodo 30%) e C3(lodo 30%) no teor de N-NH_3 , DBO_5 , DBO_5/DQO , alcalinidade e do pH. Apesar de o lodo aumentar a concentração de alguns parâmetros do lixiviado nos primeiros dias após sua aplicação, os valores tendem a baixar e a ficarem próximos de uma célula normal (C1) e atendem aos limites preconizados pela legislação Brasileira. Conclui-se, desse modo, que a técnica de aplicação de lodo de esgoto em coberturas de aterros tem bom potencial de aplicação para o contexto estudado.

PALAVRAS – CHAVE: Lodo de Esgoto, Aterro sanitário, Camada de cobertura, Lixiviados

ABSTRACT

One of the challenges of sanitation enterprises is to find alternative techniques for the management of sewage sludges from wastewater treatment plants drains, an activity concerning high complexity and high costs. Among several alternatives, the WWTP sludge can be used as cover material for landfills whenever the burying waste does not reach the quality standards required for agricultural recycling. On the other hand, the outer layers of landfills guarantee safety conditions of burying wastes, because they are capable of minimize infiltration of water into the waste mass to prevent leachate generation and mitigate the impacts resulting from exposure to this material to the environment. Thus, this study investigated the effects of the use of sludge from a wastewater treatment plants (WWTP) by considering the characteristics of the leachate and its use as cover material for landfills. The study consisted of monitoring of the leachate generated in experimental cells filled with solid waste materials with different cover materials for 16 weeks. A cell reference containing clay soil cover (C1) from quarry site; another cell (C2), a mixture of soil and stabilized sludge layer in its coverage.

The experimental methodology of the research also involved the characterization of sludges from sewage treatment plants and the relation of rainfall data provided by the Solar Energy Laboratory of the UFSC (LEPTEN / LABSOLAR). Subsequently, we performed a statistical analysis that focuses on the variability of leachate's characteristics generated in the cells as a function of coating layers tested. The results showed that cell C2 (soil: clay 30%) set forth higher overall averages of pH, alkalinity, COD, N-NO_2^- , N-NO_3^- , P, solids (ST, SV, SF), Cu and Zn. However, statistical tests proved statistical differences between cells C2 (soil + sludge 30%) and C3 (30% clay) for the concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$, BOD5, BOD5/COD, alkalinity and pH. Although the sludge increased the concentration of some parameters of the leachate in the first days after application, the values tend to decrease and become close to a normal cell (C1) and meet the limits recommended by the Brazilian legislation. The conclusion is thus that the technique of applying sewage sludge in landfill covers has good potential for application to the study context.

Key-words: sewage sludges, landfill, cover layer, leachate

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas de tratamento de Lodo	37
Quadro 1 - Nível de atenuação obtido com diferentes tipos de processos de estabilização	38
Figura 2 – Componentes principais de um aterro sanitário.....	42
Figura 3 - Coletor de gases de aterro Sanitário	43
Figura 4 - Compartimentos de um aterro sanitário.	44
Quadro 2 - Materiais alternativos usados em coberturas diárias e intermediárias.....	46
Figura 5 - Componentes de um sistema de cobertura final.	47
Figura 6 - Biossólidos aplicado em aterro sanitário em Vancouver, EUA	50
Figura 7 - variação das concentrações da DQO dos reatores em triplicata	52
Figura 8 - variação dos valores de N-NH ₃ ao longo do experimento..	52
Figura 9 - Planta baixa do piloto experimental.	63
Figura 10 - Corte esquemático (A-A') das células do aterro experimental.....	64
Figura 11 - Pontos de amostragem no piloto experimental.....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos em 2006.....	65
Gráfico 2 - Variação do pH ao longo do tempo nas células C1, C2 e C3.	73
Gráfico 3 - Box Plot do pH	73
Gráfico 4 - Variação da alcalinidade nas células experimentais ao longo do tempo.....	75
Gráfico 5 - Box Plot da Alcalinidade nas células C1,C2 e C3	75
Gráfico 6 - Comportamento do parâmetro DQO ao longo do tempo nas células experimentais	78
Gráfico 7 - Box-Plot de DQO nas células C1, C2 e C3	78
Gráfico 8 - comportamento da variável DBO ₅ do lixiviado produzido nas células C1, C2 e C3	80
Gráfico 9 - Precipitações diárias ao longo do tempo.....	80
Gráfico 10 - Box Plot da DBO ₅ em C1(Solo), C2(Solo+lodo 30%) e C3 (Lodo 30%)	81
Gráfico 11 - Variação da razão DBO ₅ /DQO nas células experimentais	83
Gráfico 12 - Box Plot da relação DBO ₅ /DQO das células do piloto experimental.....	83
Gráfico 13 - Variação temporal da concentração de Nitrato nas células experimentais.	85
Gráfico 14 - Box Plot de Nitrato nas células experimentais	85
Gráfico 15 - Variação temporal da concentração de nitrito nas células C1,C2 e C3.....	87
Gráfico 16 - Comportamento do N-NH ₃ nas células C1(solo), C2(solo+lodo 30%) e C3(lodo 30 %).	88
Gráfico 17 - Box Plot de N-NH ₃ em C1(solo), C2(solo+lodo 30%) e C3(lodo 30%).	89
Gráfico 18 - Variação da concentração de fósforo total nas células C1,C2 e C3.....	91
Gráfico 19 - Box Plot de Fósforo Total nas células experimentais	92
Gráfico 20 – Box Plot do Volume entre o 217º e 322º dia.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volume total de resíduos sólidos coletados, segundo as Grandes Regiões – 2008	34
Tabela 2 - Composição física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis	35
Tabela 3 - Custo de algumas alternativas de disposição final de lodo de esgoto.	41
Tabela 4 - Características físicas e químicas de lixiviados de acordo com a idade do aterro.	56
Tabela 5 - Composição típica dos lixiviados de aterros sanitários brasileiros.	57
Tabela 6 - Caracterização detalhada do lodo “in natura”.	60
Tabela 7 .- Composição e Propriedades da Cal.....	62
Tabela 8 - Relação dos parâmetros físico-químicos e os respectivos métodos analíticos.....	67
Tabela 9 -Tabela de Análise de Variância.....	70
Tabela 10 - Teste Tukey.....	74
Tabela 11 .- Teste Tukey.....	76
Tabela 12 . Teste Tukey	79
Tabela 13 - Comparação de Médias par a par (Teste Tukey).....	82
Tabela 14 - Teste Tukey.....	84
Tabela 15 - Teste Tukey de N-NO ₃	86
Tabela 16 - Teste Tukey.....	90
Tabela 17 - Teste Tukey.....	92
Tabela 18 - Volume (mL) de lixiviado gerado nas células experimentais	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
APHA	American Public Health Association
Ca	Cálcio
CASAN	Companhia Catarinense de Água e Saneamento
COD	Chemical Oxygen Demand
COMCAP	Companhia de Melhoramentos da Capital
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
d.m.s	valor da diferença mínima significativa
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ENS	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe	Ferro
H0	hipótese nula
H1	Hipótese Alternativa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
LARESO	Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos
LEPTEN	Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de energia
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
LETE	Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto
LIMA	Laboratório Integrado do Meio Ambiente
MQG	Quadrado médio dos grupos
MQR	Quadrado médio do resíduo
NBR	Norma Brasileira
NH ₃	Amônia não ionizada
NO ₂	Nitrito
NO ₃	Nitrato
O ₂	Oxigênio
P total	Fósforo Total
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
pH	Potencial de Hidrogênio
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
R	número de repetições de cada tratamento.
R1	Reator 1
R2	Reator 2

SQG	Soma dos quadrados do grupo
SQR	Soma dos quadrados do resíduo
SQT	Soma dos quadrados total
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis Totais
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USEPA	United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
2 JUSTIFICATIVA.....	31
3 OBJETIVOS.....	32
3.1 OBJETIVO GERAL	32
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
4.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	33
4.1.1 Caracterização dos resíduos sólidos de Florianópolis.....	34
4.2 LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	36
4.2.1 Adensamento do lodo	37
4.2.2 Estabilização do lodo	37
4.2.3 Condicionamento do lodo	38
4.2.4 Desaguamento do lodo	39
4.2.5 Higienização do lodo	39
4.2.6 Alternativas para disposição final de lodo de esgoto sanitário.....	40
4.3 ATERROS SANITÁRIOS.....	41
4.3.1 Camadas de cobertura de aterro sanitário	44
4.3.1.1 Camada de cobertura diária e intermediária.....	45
4.3.1.2 Camada de cobertura final	47
4.3.2 Uso de lodo em camadas de cobertura de aterros	49
4.4 LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO	54
5 METODOLOGIA	59
5.1 CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DO LODO PROVENIENTE DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	59
5.2 DESCRIÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO EXPERIMENTAL	62
5.3 COLETA DE AMOSTRAS	66
5.4 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICO UTILIZADOS PARA AVALIAR A QUALIDADE DO LIXIVIADO	67
5.5 CLASSIFICAÇÃO DO EFLUENTE	68
5.6 OBTENÇÃO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	68
5.7 TRATAMENTOS DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA....	69
5.7.1 Estatística Descritiva.....	69
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
6.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNIO-PH	72
6.2 ALCALINIDADE	74
6.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO-DQO	76
6.4 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO-DBO5	79
6.5 RELAÇÃO DBO5/DQO.....	82
6.6 NITRATO E NITRITO	84

6.7 NITROGÊNIO AMONÍACAL (N-NH ₃).....	87
6.8 FÓSFORO TOTAL.....	90
6.9 INFLUÊNCIA DO LODO NA GERAÇÃO DE LIXIVIADO	93
7 CONCLUSÃO	95
8. RECOMENDAÇÕES	97
REFERÊNCIAS.....	98
APÊNDICE(S).....	107

1 INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de esgoto têm o principal objetivo de remover as cargas poluentes do esgoto, devolvendo ao ambiente o efluente tratado em conformidade com os padrões exigidos pela legislação ambiental.

Os resíduos sólidos gerados nos processos de tratamento de esgotos, mais conhecidos como lodo ou biossólidos, são ricos em nutrientes e matéria orgânica. Contudo, também é verificada a presença de componentes indesejáveis como microrganismos patógenos e metais pesados. (HAANDEL;ALÉM SOBRINHO, 2006). Estas características, no entanto, variam conforme os constituintes do efluente sanitário, a operação da estação de tratamento e o tipo de tratamento adotado.

No Brasil, a disposição correta de lodo de estações de tratamento de esgoto de forma ambientalmente adequada é mais um desafio enfrentado pelas companhias de saneamento nestes últimos anos. Além disso, é notável o crescimento populacional que vem ocorrendo nas regiões metropolitanas brasileiras e o consequente aumento das demandas para tratamento de esgoto. Este cenário favorece a ampliação dos problemas relacionados ao seu tratamento e disposição final.

A maioria das ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) opta por enviar o lodo de esgoto para aterros sanitários, mas também o aproveita como condicionador e fertilizante do solo em algumas regiões. O lodo também pode ser aproveitado como matéria prima para a produção de tijolos, agregado leve, e material de cobertura diária e final de aterros sanitários.

O emprego do lodo em coberturas de aterro sanitário é uma atividade realizada em diversos países como os Estados Unidos, o Canadá, Itália, Noruega, China, África do Sul e escolhida quando o biossólido não atinge qualidade exigida para outros usos mais nobres, como agricultura ou como alternativa estratégica. (LEBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008).

Dentre as vantagens do uso do lodo como camada de cobertura diária de aterro sanitário, destaca-se a sua capacidade de melhorar a qualidade dos lixiviados, acelerar a decomposição dos resíduos e de aumentar a produção de metano. (RHEW; BARLAZ, 1995; GRIFFIN et.al., 1998 *apud* PIMENTEL, 2012).

O presente projeto consiste na realização do estudo quanto à utilização do lodo em camada de cobertura de aterro sanitário, no sentido de se avaliar sua influência na qualidade do lixiviado de um aterro sanitário. O trabalho consistiu no monitoramento de um sistema

piloto durante cinco meses do lixiviado gerado, em continuidade ao monitoramento iniciado pelo mestrando Francisco José Guedes Pimentel em 2012. Objetiva-se, assim, contribuir na ampliação do conhecimento sobre a utilização de materiais alternativos em coberturas de aterro sanitário.

2 JUSTIFICATIVA

A geração de lodo no Brasil tende a aumentar, por que com as atuais políticas federais de universalização de saneamento básico, como a Lei do Saneamento– Lei 11.445/2007 – e o plano PAC (Plano de Aceleração do crescimento) o número de ETEs (Estações de tratamento de esgoto) aumentará.

A disposição final do lodo é uma etapa problemática no processo operacional de uma estação de tratamento de esgoto, porque o seu planejamento tem sido negligenciado e apresenta um custo que poderá chegar até 50% do orçamento de um sistema de tratamento. (CAMARGO, 2006).

Em Florianópolis, atualmente a CASAN deposita o lodo derivado do seu tratamento de esgotos domésticos em aterro sanitário, mas a empresa pretende reduzir os custos elevados de destinação deste resíduo e estudar alternativas para o seu aproveitamento como matéria prima, pois isto é economicamente e ambientalmente preferível ao seu simples descarte.

Em outro contexto, os aterros requerem grande quantidade de material de cobertura, normalmente jazidas de solo, que são exploradas a um custo alto para suprir esta demanda, e após serem usufruídas não são na sua maioria recuperadas, ocasionando passivos ambientais.

Por este motivo, a CASAN, juntamente com a FAPESC e em parceria com a UFSC desenvolveu o projeto denominado “Estudos sobre o gerenciamento de lodos produzidos na estação de tratamento de Esgotos Insular, o qual teve continuidade com o presente trabalho de conclusão de curso.

Segundo Franceschet et al., (2005) o tipo de material de cobertura do aterro sanitário influencia na qualidade do lixiviado.

É importante que sejam estudadas as características do lixiviado, pois indicam o grau de decomposição dos resíduos e revelam os principais poluentes a se tratar.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do lodo de esgoto aplicado como cobertura de aterro sanitário na qualidade do lixiviado, considerando-se seus aspectos físico-químicos

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar em um piloto experimental a variação temporal da qualidade dos lixiviados em função de parâmetros climáticos e das camadas de cobertura testadas;
- Determinar através de análise estatística as correlações entre os parâmetros físico-químicos em presença do lodo de esgoto estabilizado na cobertura.
- Verificar a influência da camada de lodo de esgoto na geração de lixiviados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho aborda a revisão bibliográfica sobre três temas fundamentais- resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto e aterros sanitários com enfoque em camada de cobertura e lixiviado.

4.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A definição de resíduos sólidos pode ser colocada da seguinte maneira:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.(ABNT, 2004, P.7)

Resíduos sólidos urbanos (RSU) são designados como o conjunto de resíduos sólidos gerados em áreas urbanas excetuando os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos, de aeroportos e portos. (ABNT, 1992). Os resíduos são classificados de acordo com as suas propriedades, sua origem, sua potencialidade de causar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, sendo que a NBR 10004 (ABNT, 2004) os divide em seguintes classes:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
 - resíduos classe II A – Não inertes.
 - resíduos classe II B – Inertes.

Resíduos perigosos são aqueles que em função de suas características físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem apresentar riscos à saúde pública. Os resíduos não perigosos e não inertes não se enquadram na classe I-Perigosos ou na classe II-B e podem apresentar características tais como: combustibilidade, biodegradabilidade, ou solubilidade em água. Os resíduos não perigosos e

inertes, classificados como classe II-B, quando submetidos ao teste de solubilização não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, exceto cor, turbidez, dureza e sabor.

Através dos dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico-PSNB, sabe-se que o Brasil coleta diariamente cerca de 183.488 toneladas de resíduos sólidos.

A **tabela 1** apresenta o volume total de resíduos sólidos coletados diariamente nas grandes regiões brasileiras.

Tabela 1 - Volume total de resíduos sólidos coletados, segundo as Grandes Regiões – 2008

Grandes Regiões	Volume total de resíduos coletados (t/dia)
Brasil	183 488
Norte	14 639
Nordeste	47 207
Sudoeste	68 181
Sul	37 342
Centro-Oeste	16 120

Fonte: PNSB 2008, IBGE (2010)

4.1.1 Caracterização dos resíduos sólidos de Florianópolis

Quando se realiza um estudo que envolve formas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos de uma determinada região é importante conhecer a sua composição. (FERREIRA, 2010). A caracterização dos resíduos sólidos pode ser física, química e biológica e também depende de vários fatores como: localidade, número de habitantes, poder aquisitivo, atividades econômicas, nível educacional, atividades econômicas, costumes da população, fatores climáticos. (COMCAP, 2002).

O resumo da caracterização física dos resíduos sólidos urbanos gerados no município pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis

COMPONENTE	PROPORÇÃO EM MASSA
Plástico Duro	4,98%
Plástico Mole	9,94%
Papel	10,93%
Papelão	3,29%
Vidro	4,10%
Têxteis e couro	3,68%
Sanitários	8,87%
Metais	3,90%
Outros	3,96%
Orgânico	46,35%
TOTAL	100%

Fonte: COMCAP, 2002

Na composição gravimétrica verifica-se que a fração orgânica é a mais significativa dos RSU, como nas demais cidades brasileiras. A grande quantidade de resíduos orgânicos que ainda vem sendo recolhida de forma misturada pela coleta convencional, propicia ocorrência dos principais impactos ambientais a serem minimizados no aterro sanitário. A matéria orgânica em meio anaeróbio gera líquidos e gases ácidos, que juntamente com a água que percola pelo aterro vai carreando os compostos tóxicos, como metais pesados, presentes em embalagens plásticas, papéis, pilhas, e etc.

Para a cidade de Florianópolis o valor obtido está um pouco abaixo da média nacional que é de 52,2%. (IPT, 2000 apud COMCAP, 2002). Os plásticos representam a segunda parte mais significativa (14,92%).

A composição dos resíduos sólidos urbanos é uma característica que está diretamente relacionada aos aspectos quantitativos e qualitativos dos líquidos percolados formados durante a composição desses resíduos. (GOMES, 2005).

4.2 LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Segundo Andreolli e Pegorini (2003 *apud* LESSA, 2005) o lodo pode apresentar até 60% dos custos operacionais das ETE'S.

O sistema de esgotamento sanitário é constituído por três fases diferentes e interligadas a coleta dos esgotos: tratamento de esgotos, disposição final do efluente líquido, disposição final do resíduo. (SOBRINHO, 2001 *apud* LESSA, 2005).

Segundo Lessa (2005) todos os sistemas de tratamento de esgoto em sua fase líquida, seja pela remoção de sólidos sedimentáveis do esgoto, seja pelo tratamento biológico, geram lodo de esgoto que é removido do sistema de tratamento da fase líquida e que necessita de tratamento e disposição final. Os sistemas de tratamento de esgoto sanitário produzem duas fases: líquida e sólida. Na fase líquida o efluente tratado é lançado ao manancial e a fase sólida é composta por uma mistura de sólidos com água que continua na ETE para posterior tratamento e estabilização.

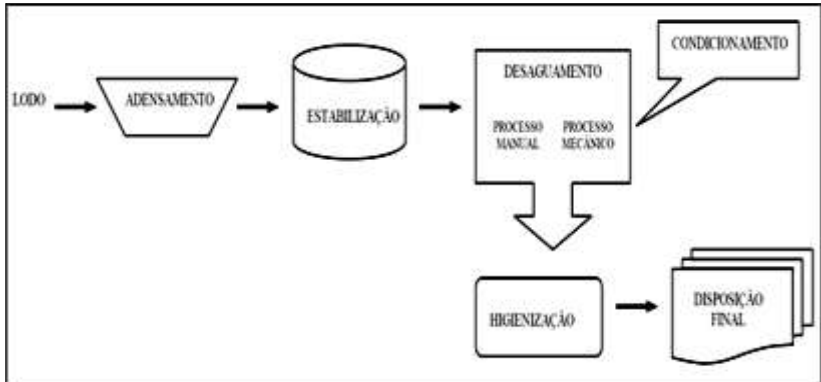
Para Andreoli (1999) “lodo é uma mistura de matéria orgânica e inorgânica.”

Conforme DMAE (1978 *apud* LESSA, 2005) e SANEPAR (1997 *apud* LESSA, 2005) o lodo pode ser classificado em quatro grupos quanto ao seu grau de umidade:

- a) Lodos “*in natura*”: Os lodos *in natura* compreendem aqueles todos retirados logo após o processo de tratamento de esgoto e que possuem um teor de umidade em torno de 98%.
- b) Lodo parcialmente desidratado : são aqueles que são submetidos a um processo de desidratação, podendo este ser mecânico ou natural. O teor de umidade se encontra na faixa de 30 a 50%.
- c) Lodo seco: É um material formado por mais de 99% de sólidos, o qual somente pode ser obtido mediante processo de secagem artificial em estufa.
- d) Lodo incinerado: É representado pela cinza resultante do processo de incineração, podendo ser material do lodo seco como também do lodo desidratado.

O lodo produzido nas ETE's deve passar por determinado tipo de tratamento para adequar-se à destinação final desejada do gerador. Destacam-se como principais etapas (figura 1): adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento, higienização.

Figura 1 - Etapas de tratamento de Lodo



Fonte: LIMA, 2010

4.2.1 Adensamento do lodo

Na etapa de adensamento ocorre a redução da água no resíduo, através de meios físicos. Como o lodo contém elevada quantidade de água até 99,6% (JORDÃO, 1995 *apud* BUDA, 2004), deve-se realizar a redução do seu volume aumentando conseqüentemente a concentração de sólidos. As alternativas mais comuns para o adensamento do lodo são, respectivamente, adensamento por gravidade e adensamento por flotação com ar dissolvido. (ROSARIO, 2007). Segundo o mesmo autor, adensamento por gravidade consiste no aumento da concentração do lodo através do processo de sedimentação da matéria em suspensão. Enquanto que no adensamento por flotação com ar dissolvido, é introduzido o ar sob elevada pressão para separar a fase líquida da fase sólida. (BUDA, 2004).

4.2.2 Estabilização do lodo

A estabilização compreende a etapa que tem por objetivos diminuir a quantidade de patógenos, eliminar os maus odores e reduzir ou abolir o potencial de putrefação do lodo. (LESSA, 2005).

Os processos de estabilização podem ser químicos, físicos e biológicos. (FERNANDES; SOUZA, 2001). O mesmo autor ainda cita os métodos mais utilizados:

- a) Estabilização alcalina
- b) Digestão Anaeróbia
- c) Digestão Aeróbia
- d) Digestão Termofílica Autotérmica (ATAD)
- e) Compostagem

O quadro 1 mostra a eficiência na redução de patógenos, putrefação, e geração de odores para os diferentes métodos de estabilização de lodos.

Quadro 1 - Nível de atenuação obtido com diferentes tipos de processos de estabilização

Processo	Nível de Atenuação		
	Patogênicos	Putrefação	Potencial de Odor
Estabilização alcalina	Bom	Razoável	Razoável
Digestão aneróbia	Razoável	Bom	Bom
Digestão aeróbia	Razoável	Bom	Bom
Digestão termofílica autotérmica	Excelente	Bom	Bom
Compostagem	Razoável	Bom	Ruim a Razoável
compostagem termofílica	Excelente	Bom	Ruim a Razoável

Fonte: METCALF ; EDDY, 2003 apud SILVEIRA, 2007.

A estabilização alcalina tem como finalidade inibir os processos de biodegradação e reduzir organismos patogênicos (METCALF & EDDY, 2003; FERNANDES e SOUZA, 2001). Segundo FERNANDES e SOUZA (2001) a digestão termofílica autotérmica tem como principal vantagem a destruição de microrganismos patogênicos presentes no lodo.

4.2.3 Condicionamento do lodo

A etapa de condicionamento de lodo é utilizada para melhorar a desidratação do mesmo e a captura das partículas sólidas. Este processo pode ser influenciado por fatores físicos, químicos e biológicos. (MIKI,

1998). Dentre os fatores físicos pode-se citar distribuição e tamanho das partículas e o grau de mistura. Os fatores químicos que afetam o condicionamento são: pH, alcalinidade, concentração de sólidos, carga superficial e a natureza da associação água-sólidos no lodo.

Segundo Gonçalves et al. (2001), os condicionadores proporcionam um aumento no teor de sólidos de 4% a 6% em lodos ativados ou mistos de descarte, porém sem eles dificilmente se poderá aumentar a concentração para valores acima dos citados.

4.2.4 Desaguamento do lodo

A etapa de desaguamento é uma operação unitária física que diminui o volume do lodo por meio da redução do seu teor de água, atingindo de 13 a 70% de ST. (ANDREOLI, 2000 *apud* MANZOCHI, 2008).

Os principais objetivos do desaguamento são: reduzir o volume do lodo a ser descartado, reduzir os custos de transporte e disposição, facilitar o manuseio, permitir a incineração se for o caso, diminuir a produção de chorume caso a disposição final seja em aterro sanitário, garantir certa redução na geração de maus odores. (METCALF; EDDY, 1991 *apud* MANZOCHI, 2008).

O desaguamento do lodo pode ser feito por meio mecânico ou natural. No desaguamento mecânico os processos mais comuns são: centrífugas, prensas desaguadoras e filtros-prensa. Os métodos mais utilizados na secagem natural são leitos de secagem e lagoas de secagem do lodo.

4.2.5 Higienização do lodo

A higienização do lodo assegura a redução ou eliminação de microrganismos patogênicos como cistos de protozoários, ovos de helmintos, colônias de bactérias, hifas de fungos, e alguns vírus, contribuindo, dessa forma para utilização do lodo na agricultura (ANDREOLI et al., 2001).

Segundo Manzochi (2008) existem diferentes métodos para higienização do lodo da ETE:

- a) Higienização Biológica
- b) Higienização Química
- c) Higienização Física
- d) Caleação

- e) Tratamento Térmico
- f) Compostagem

Andreoli et.al. (2001) cita os três processos de higienização considerados mais econômicos: caleação, compostagem e tratamento térmico

4.2.6 Alternativas para disposição final de lodo de esgoto sanitário

A disposição final do lodo obtido no tratamento de esgoto representa até 50 % de custos operacionais. (CAMARGO, 2006).

As alternativas de disposição final desse lodo são:

- a) Aterros Sanitários
- b) Disposição Oceânica
- c) Incineração
- d) Uso agrícola
- e) land farming
- f) Construção Civil
- g) Lagoas de decantação
- h) Reflorestamento. (MELO; GUIMARÃES, 2002).

Na Europa e Canadá o uso de biossólidos em agricultura é de aproximadamente 37% do total produzido, já nos Estados Unidos o percentual é de aproximadamente 25%. (TSUTIYA, 1999 apud MELO; GUIMARÃES, 2002).

A incineração apresenta um custo operacional elevado , além de problemas secundários como problemas relacionados com a poluição atmosférica e disposição final adequada para cinzas. (FERREIRA; ANDREOLI; LARA, 1999).

O lodo de esgoto é uma fonte importante de nutrientes usada para a fertilização do solo, porém o teor de metais em sua composição pode limitar o seu uso agrícola. (RANGEL et al.,2006). A principal desvantagem do uso do lodo como fertilizante é o potencial de acumulação excessiva de metais pesados no solo que pode causar toxidez às plantas e atingir o homem por meio de cadeia alimentar. (MARTINS et al., 2003). Portanto, a reciclagem na agricultura exige a produção de um biossólido dentro dos padrões de qualidade (MANZOCHI, 2008).

A disposição em aterros é adotada quando a qualidade do lodo ou a viabilidade econômica não é compatível com a reciclagem. Segundo

EPA –Environmental Protection Agency (1979 apud MANZOCHI, 2008) o aterro sanitário é a alternativa mais econômica, mesmo com o aumento de custos resultantes de procedimentos de controle ambiental e dos processos de secagem e alocação de área.

A tabela 3 apresenta os custos por tonelada relativos às diferentes formas de disposição

Tabela 3 - Custo de algumas alternativas de disposição final de lodo de esgoto.

Disposição	Custo (US\$/t)
Oceânica	12-50
Aterros Sanitários	20-60
Incineração	55-2500
Uso agrícola	20-125

Fonte: CARVALHO; BARRAL, 1981 apud INGUZA, 2006

4.3 ATERROS SANITÁRIOS

Os resíduos sólidos são gerados de forma contínua e sua disposição de maneira adequada torna-se necessária, sendo assim, os aterros têm sido o método mais aceito em termos econômicos e ambientais (TCHOBANOGLIOUS, THEISEN; VIGIL, 1993 *apud* FERREIRA, 2010).

Segundo PNSB 2008, 27,7 % dos municípios brasileiros adotaram a destinação de resíduos sólidos urbanos a aterros sanitários e 50,8 % adotaram a destinação considerada inadequada de resíduos, em lixões (IBGE, 2010).

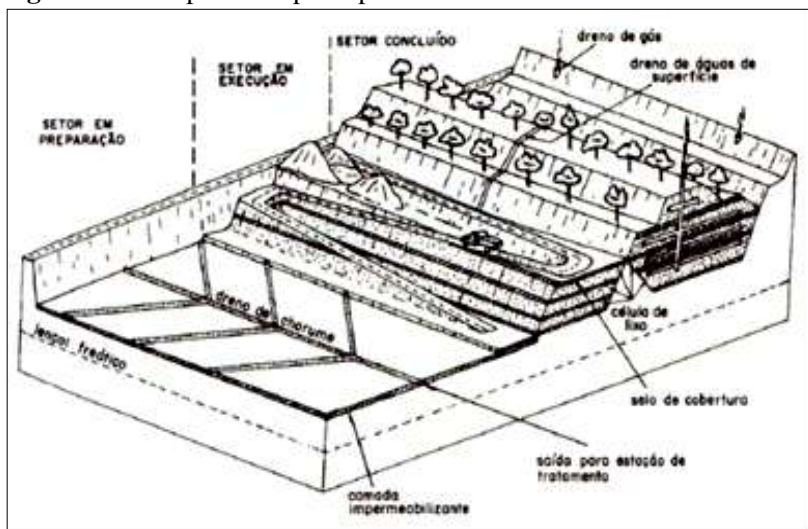
A Norma NBR 8419 (ABNT, 1992), define aterro sanitário como sendo:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores quando necessário.

Bidone e Povinelli (1999 *apud* BASSANI, 2010) definem o aterro sanitário como uma alternativa de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, através do confinamento seguro dos resíduos, utilizando os métodos de engenharia e atendendo as normas operacionais específicas, de forma a evitar danos ou riscos à saúde pública e a minimizar impactos ambientais.

Segundo Pessin et al. (2002) aterro sanitário deve constituir-se, entre outras estruturas, de dispositivos de sistema de drenagem superficial, sistema de drenagem e tratamento de lixiviados, impermeabilização superior e inferior, sistemas de drenagem e tratamento de gases (figura 2).

Figura 2 – Componentes principais de um aterro sanitário.



Fonte: IPT/CEMPRE (2000 *apud* BASSANI, 2010)

Segundo Reichert e Anjos (1997) o sistema de drenagem superficial é instalado em aterros com o objetivo de impedir que a água de escoamento superficial e da chuva atinjam a área de depósito dos resíduos, reduzindo desse modo o volume do lixiviado.

O sistema de drenagem dos líquidos percolados tem a função de remover e conduzir do aterro o chorume e líquidos provenientes da infiltração da água de chuva para unidade de tratamento. (FERREIRA, 2010).

Segundo a mesma autora, os principais gases gerados nos aterros sanitários são: CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2 e H_2S . Dentre os gases liberados, o gás metano é o de maior destaque, pois é produzido até 60% do gás gerado no aterro e possui uma ação 25 vezes maior do que o dióxido de carbono relativamente à retenção do calor responsável pelo aquecimento global (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007 apud TEIXEIRA et al., 2009, FERREIRA, 2010).

O controle da geração e migração desses gases é realizado através de um sistema de drenagem, composto pela superposição vertical de tubos perfurados de concreto ou PVC revestidos de brita (LEITE, 1991 apud FERREIRA, 2010; PESSIN et al., 2002) conforme mostra a **Figura 3**

Figura 3 - Coletor de gases de aterro Sanitário



Fonte: FERREIRA, 2010

O sistema de impermeabilização tem a função de impedir a infiltração do chorume no subsolo, como também de prevenir a migração de gases pelo fundo do aterro. (REICHERT, 2007)

De acordo com Gomes, Moraes e Boff (2007), o aterro sanitário é uma forma de disposição de resíduos sólidos ambiental e economicamente viável, porém apresenta alguns problemas operacionais como a lixiviação, escoamento de líquidos percolados, emissão de gases, vida útil de curta duração, e a escassez de áreas em regiões

metropolitanas para a sua implantação (GRECA 1994, apud MANZOCHI, 2008).

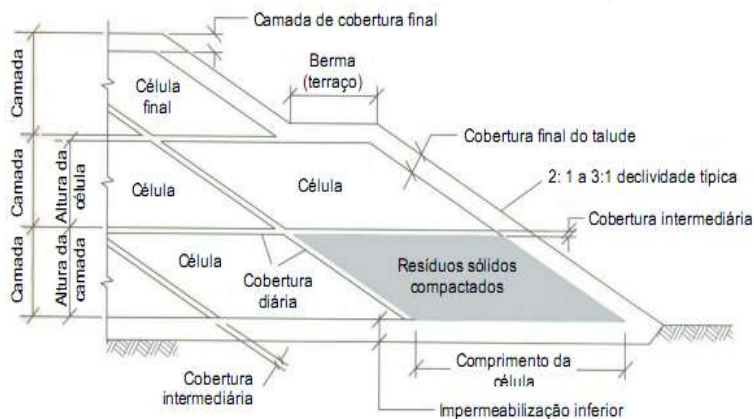
4.3.1 Camadas de cobertura de aterro sanitário

Segundo Franceschet et al.(2005) a água da chuva que percola pela camada de cobertura é uma das fontes dos líquidos percolados. No entanto, a seleção do material da camada de cobertura é um parâmetro importante, visto que suas propriedades influenciam na percolação e infiltração dos líquidos.

A camada de cobertura tem a função de produzir uma barreira física de forma horizontal e impermeável com a finalidade de reduzir a infiltração de água de precipitação, reduzir proliferação de vetores, diminuir a exalação de odores, impedir a catação, permitir tráfego de veículos coletores sobre o aterro, eliminar a queima de resíduos e a saída descontrolada de biogás, proteger a saúde humana e o meio ambiente (RIZZO; LOLLO, 2006 apud QUISSINI, 2009; FRANCESCHET et al., 2005; FERREIRA; MAHLER, 2006).

O sistema de cobertura de aterro sanitário é constituído por camada diária, intermediária e final (Reichert, 2007) como pode ser verificado nos compartimentos da figura 4.

Figura 4 - Compartimentos de um aterro sanitário.



Fonte: REICHERT, 2007

4.3.1.1 Camada de cobertura diária e intermediária

A cobertura diária dos resíduos é realizada ao final de cada jornada de trabalho. (GOMES; MARTINS, 2003). A espessura desta camada normalmente varia entre 10 e 20 cm. (JARAMILLO, 1991 *apud* LANGE *et al.*, 2006). As normas brasileiras existentes, especialmente a NBR 8419:1992 e NBR 13896:1997 que tratam de aterros sanitários não especificam a espessura desta camada. (PIMENTEL, 2012).

A cobertura intermediária é aplicada em locais cuja superfície ficará inativa por mais tempo e tem como função principal o controle de vetores, evitar o espalhamento de resíduos pelo vento e fornecer suporte ao meio de transporte. (GOMES; MARTINS, 2003; QUISSINI, 2009). A sua espessura é mais espessa que a camada diária, em torno de 30 cm. (FERREIRA; MAHLER, 2006; PIMENTEL, 2012).

Segundo Peyton e Schoeder (1988 *apud* FERREIRA; MAHLER, 2006) o tipo de material de cobertura influencia de forma significativa no acúmulo da umidade. No entanto, é importante conhecer as propriedades do material de cobertura devido à sua influência durante a operação do aterro. Em aterros sem recirculação do lixiviado deverão ser aplicadas camadas intermediárias que permitem a entrada e o espalhamento do líquido percolado pela massa dos resíduos. (GOMES; MORAES; BOFF, 2007). Segundo os mesmos autores, em aterros sem esta técnica podem ser aplicadas barreiras impermeáveis que impedem a entrada da água.

O **quadro 2** apresenta exemplos de materiais alternativos que podem ser utilizados em coberturas diária e intermediárias de aterros sanitários.

Quadro 2 - Materiais alternativos usados em coberturas diárias e intermediárias

Materiais cobertura diária	Descrição
<i>Resíduos da Construção Civil (RCD)</i>	Solos ou entulhos resultantes da construção civil podem ser utilizados para fazer cobertura diária e intermediária de aterros sanitários (GOMES; MORAES; BOFF, 2007; REICHERT, 2007)
<i>Espuma long- lasting Aft-500</i>	Camada de espuma que pode ser aplicada com pulverizadores, cuja cobertura dura 40 dia após sua aplicação (LANGE 46d at., 2006)
<i>Mantas sintéticas</i>	Mantas geotêxtil ou mantas plásticas de polipropileno, também chamadas geossintéticas são coberturas colocadas no fim da jornada de trabalho e retirada no dia seguinte para colocação de mais resíduos. Possuem a vantagem de não ocupar o volume que camada de 15 cm de solo ocuparia (McBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).
<i>Composto orgânico</i>	A utilização de Composto orgânico é indicada para camadas de cobertura, pois é feita em parte com resíduos que seriam aterrados e por ter bom potencial para oxidar metano – quando em condições aeróbias (TANTHACHOON; CHIEMCHAI SRI; CHIEMCHAI SRI, 2007). É preciso o material bem estabilizado para evitar a geração de maus odores (ROSE, 2009).
<i>Lodo (ETE, ETA, Indústria papel)</i>	Lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) estabilizado e com umidade menor que 50% pode ser utilizado como cobertura diária em aterros sanitários (GRIFFIN 46d al., 1998). Lodo de estação de tratamento de água também tem potencial de ser utilizado para esta finalidade (LANGE 46d at., 2006), assim como lodo de indústria de papel (TEIXEIRA, 2002).
<i>Outros</i>	Dentre outros materiais, há pesquisas que indicam potencial de cobertura de <i>areia de fundição</i> (GOMES, MORAES, BOFF, 2007; QUISSINI, 2009) e de mistura de <i>resíduos de poda e capina com madeira</i> (Mc BEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

Fonte: PIMENTEL, 2012.

4.3.1.2 Camada de cobertura final

As camadas de cobertura final são utilizadas para proporcionar uma barreira para água e não para lixiviado. (REICHERT, 2007).

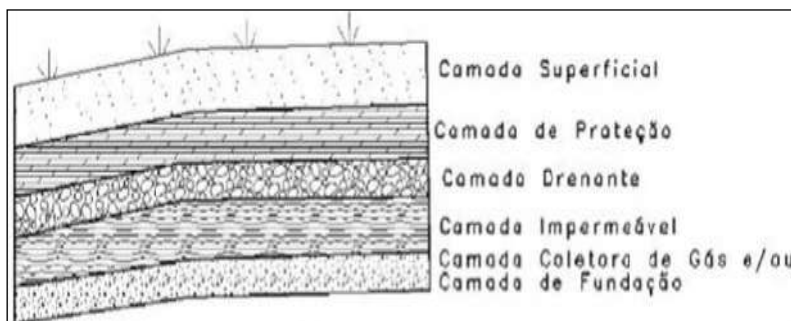
Segundo Lange et al. (2006; REICHERT, 2007) elas apresentam as seguintes finalidades:

- Minimizar a infiltração da água da chuva dentro das células do aterro, diminuindo deste modo, a geração de lixiviado;
- Separar os resíduos dos vetores como animais, roedores e insectos;
- Impedir o vazamento descontrolado dos gases gerados no aterro para a atmosfera;
- Atuar como uma superfície com coeficiente de permeabilidade menor ao solo do aterro e com resistente à corrosão;
- Favorecer a recuperação final da área e o crescimento da vegetação, melhorando o aspecto estético e paisagístico.

A espessura da camada de cobertura final varia entre 0,40 e 0,60 m JARAMILLO (1991 apud LANGE et al., 2006) e a sua inclinação encontra-se na faixa de 3 a 5%.

Segundo LANGE et al., (2006) a camada de cobertura final é constituída por camada superficial, camada de proteção, camada de drenagem, camada impermeável e camada coletora de gás (figura 5)

Figura 5 - Componentes de um sistema de cobertura final.



Fonte: LANGE et al., 2006

A *camada superficial* é composta por raízes de plantas que protegem o sistema de cobertura dos ventos, chuvas, evitando, deste modo, processos erosivos. (MAGALHÃES, 2005). Segundo o mesmo autor, a espessura desta camada é de 15 cm, o que compromete o crescimento de espécies com raízes mais profundas. Os materiais mais utilizados para esta camada são: solo, camada de geossintética de controle de erosão e blocos rochosos. (LANGE et al., 2006).

A *camada de proteção* situa-se abaixo da camada superficial como pode ser visualizado na **figura 5**. A finalidade desta camada é de proteger as camadas que se encontram abaixo da mesma e de armazenar a água da camada superficial. (MAGALHÃES, 2005). Para o mesmo autor, a espessura da camada pode ser maior que 1,5 m. Porém, a legislação alemã adota espessura mínima de 1 metro para esta camada. (SIMON; MÜLLER, 2004 apud PIMENTEL, 2012). Segundo Lange et al. (2006) os materiais empregados para esta camada são: blocos rochosos, solo, material residual recuperado ou reciclado.

A *camada de drenagem* tem a função de reduzir a proporção de água presente na camada de proteção, evitando, deste modo pressões que causam a instabilidade dos taludes na camada de cobertura. (MAGALHÃES, 2005). A espessura mínima da camada é de 30 cm, permeabilidade de 10^{-1} cm/s e a declividade de 4%. (SIMON; MÜLLER, 2004 apud PIMENTEL, 2012; MAGALHÃES, 2005).

Os materiais mais utilizados para esta camada são: blocos rochosos, solo e camada geossintética de controle de erosão. (LANGE et al., 2006).

A *camada impermeável* possui a vantagem de maximizar a captação dos gases, evitando, desta forma, o escapamento dos gases do aterro para a atmosfera. (QUISSINI, 2009). A principal função desta camada é de reduzir a infiltração da água pelo sistema de cobertura. (MAGALHÃES, 2005). Segundo Qian, Koerner e Gray (2002 apud PIMENTEL, 2012) a espessura da camada deve possuir no mínimo 45 cm de espessura.

Os materiais mais usados são: argila compactada, geomembrana, argila geossintética e rejeitos. (LANGE et al., 2006). Segundo Quissini (2009), a geomembrana é mais usada em aterros com o método de recirculação de lixiviados, pois, possui a desvantagem de diminuir a umidade do aterro.

A *camada coletora de gás* localiza-se acima da camada dos resíduos e tem a função de conduzir os gases produzidos pela decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos para a

atmosfera. (LANGE et al., 2006). Além disso, regulariza a superfície que servirá de suporte para camada impermeável. (PIMENTEL, 2012).

Vários materiais de alta permeabilidade são utilizados para esta camada: areia ou cascalho, geotêxtil, material residual recuperado ou reciclado. (LANGE et al., 2006).

Segundo Magalhães (2005), caso se utilize o solo para a execução da camada, é necessário que a espessura tenha no mínimo 30 cm.

As camadas de cobertura final também podem ser classificadas como coberturas evapotranspirativas e barreiras capilares. (SIMÕES et al., 2008 apud QUISSINI, 2009).

Quissini (2009) define camadas evapotranspirativas como aquelas que “apresentam uma camada de solo disposto sob condições naturais e uma cobertura vegetal com plantas nativas.”

Para Simões et al. (2008 apud QUISSINI, 2009) as barreiras capilares são aquelas construídas por solos finos depositados sobre uma camada de solo de solo granular, geralmente areia ou cascalho.

4.3.2 Uso de lodo em camadas de cobertura de aterros

A reciclagem agrícola é a forma mais difundida atualmente por ser uma alternativa de disposição de lodo com menor impacto ambiental negativo, porém, dificilmente é tolerado o uso deste subproduto quando não atinge a qualidade que garante a segurança sanitária e ambiental à população (ANDREOLI et al., 2007; PIMENTEL, 2012). O mesmo autor ainda afirma que o lodo gerado em estações de tratamento de esgoto pode ser aplicado em camadas diárias ou finais de cobertura quando este não possui qualidade compatível com os critérios exigidos na agricultura. Além disso, alguns países como Estados Unidos, Canadá, Noruega, China, Austrália, Itália, África do Sul usam esta técnica como forma de minimizar a retirada de solo em jazidas para cobertura de aterros sanitários (LE BLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008).

A figura 6 apresenta a aplicação do bio-sólido como cobertura alternativa de aterro sanitário em Vancouver, EUA

Figura 6 - Biossólidos aplicado em aterro sanitário em Vancouver, EUA



Fonte: HDR Engineering, Inc. (2009) apud PIMENTEL, 2012.

Em um estudo realizado por Farrel em 1988 fez-se uma comparação entre o lixiviado de células compostas por lodo de esgoto e resíduos urbanos e células preenchidas somente com resíduos urbanos. (GRIFFIN et al., 2008 apud PIMENTEL, 2012)

Os resultados do monitoramento que teve 20 meses de duração, demonstraram que as células que apresentavam lodo geraram lixiviado com demanda química de oxigênio (DQO) de 1.500 mg/L e outras células sem lodo produziram lixiviado com DQO de 30.000 mg/L. Também foram verificadas concentrações menores de metais como Cd, Cr, Cu, Ni, Fe e Zn no lixiviado gerado em células que possuíam o lodo. Portanto, o mesmo autor concluiu que o lodo usado como material de cobertura de aterro sanitário pode melhorar a qualidade do lixiviado.

Quando o lodo tem esta finalidade é necessário que seja submetido a um processo de redução de umidade e de sólidos voláteis.

Segundo Griffin et al. (1998 apud PIMENTEL, 2012) a aplicação do lodo estabilizado com teor de sólidos de 50% como camada de cobertura diária proporciona a diminuição de emissão de odores, melhora o controle de vetores; diminui o potencial de contaminação do solo e a chance de ocorrência de incêndios.

Rhew e Barlaz (1995) realizaram um estudo que deve ser focado no presente trabalho. Os mesmos autores realizaram testes em pequenos

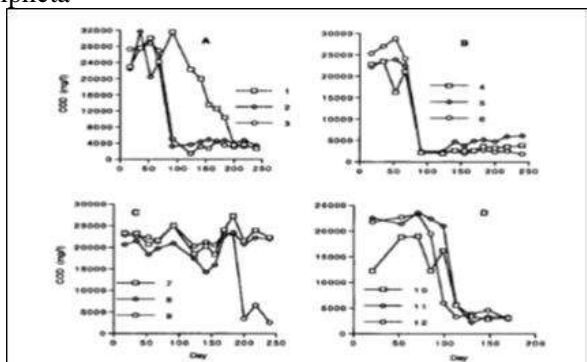
reatores que simulavam célula de aterros e verificaram que o lodo tratado com cal (LTC) aplicado como material de cobertura acelera a decomposição dos resíduos e melhora a qualidade do lixiviado. Nesta experiência foram instalados 12 reatores preenchidos com 3,2 L de resíduos sólidos urbanos revestidos com uma camada de 0,8 L. Cada grupo de 3 reatores foi revestido com diferentes materiais de cobertura: a primeira camada com 100% de solo; a segunda com 100% de cal; a terceira com 70% LTC e 30% de solo; a quarta com 40% LTC e 60% de solo.

No mesmo experimento os lixiviados dos reatores foram recirculados a uma temperatura de 40°C para a aceleração do processo de degradação dos resíduos sólidos confinados e para o incremento da produção do metano. Em lixiviados com cal ou LTC foi feita a neutralização que influenciou no aumento da produção do metano. Este efeito foi verificado nesses percolados devido à conversão de ácidos em metano que ocorre no primeiro estágio da decomposição anaeróbia (hidrólise e acidogênese).

Também observou-se que, em relação aos valores de pH, os lixiviados do grupo de reatores com cal ou LTC variaram de 5,5 a 7,5; e em lixiviados do grupo de reatores que tinham somente solo, o pH se manteve em torno de 5,5.

Pode se verificar através da figura 7, que ocorreu uma queda brusca da demanda química de oxigênio (DQO) em reatores que possuíam LTC ou cal após os primeiros dias, indicando a aceleração da decomposição matéria orgânica. Enquanto que, a variação da DQO dos reatores que possuíam somente o solo não teve um comportamento similar a dos outros, excepto o reator 9.

Figura 7 - variação das concentrações da DQO dos reatores em triplicata



A- 70% LTC + 30% Solo

B- 40% LTC + 60% Solo

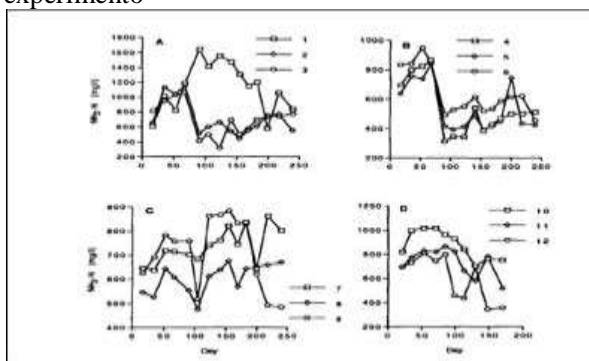
C- 100% solo

D - 100% cal

Fonte: RHEW; BARLAZ (1995).

As concentrações de amônia encontradas em cada grupo de reator podem ser verificadas na figura 8. O reator que apresentou menor concentração de amônia foi o número 4 (grupo B) que foi de 312 mg/l. Segundo os mesmos autores, a presença de cal ou LTC favoreceu à diminuição de amônia no lixiviado, pois à medida que a produção de metano aumenta a sua concentração decresce.

Figura 8 - variação dos valores de N-NH₃ ao longo do experimento



FONTE: RHEW; BARLAZ (1995).

De uma forma geral, verificou-se que as concentrações de fósforo fosfato ($P-PO_4$ -) diminuíram com o aumento do pH. A presença de LTC nos reatores do grupo A (70% LTC + 30% Solo) e do grupo B (40% LTC + 60% Solo) não influenciou de forma significativa nas concentrações iniciais de fósforo. A falta de um efeito significativo da presença de LTC poderá ser devido à baixa solubilidade de fosfato de cálcio.

Ainda, de acordo com os mesmos autores, as concentrações dos metais pesados como Cd, Cr, Fe, Ni, Pd e Zn nos lixiviados dos reatores com LTC não aumentaram ao longo do tempo. Porém, em relação ao teor de Cu foi verificado nos mesmos reatores um ligeiro aumento, mas não excedeu o limite permitido pela legislação estadunidense.

Em reatores que não possuíam LTC ou cal (grupo c), as concentrações de ferro foram significativamente maiores que nos demais reatores, indicando que o resíduo era a principal fonte de Fe.

Esperava-se que as concentrações de metais em reatores com LTC ou cal fossem diminuir ao longo do tempo, pois meios alcalinos promovem a redução da solubilidade dos metais. No entanto, durante a decomposição dos resíduos sólidos são produzidos ácidos úmicos que auxiliam na solubilização dos materiais inorgânicos, podendo, deste modo aumentar a concentração dos metais.

Os mesmos autores chegaram à conclusão de que o LTC não interfere de forma negativa na produção de metano e na qualidade de lixiviado.

Os autores Chung, Yu, Lee (2006) realizaram uma experiência para testar a hipótese de utilização de lodo solidificado como material de cobertura diária de aterro sanitário utilizando testes de compressibilidade, resistência a erosão, CBR (Califórnia Bearing Ratio), condutividade hidráulica. Para a solidificação do material foi usada a proporção 100:10:10 de lodo:cimento portland:cal e outra mistura de lodo:cinza de aço inoxidável:cal com traço 10:15:01.

Os resultados mostraram que a resistência à compressão em ambas as misturas ultrapassou 0,5kgf/cm², isto é, o valor requerido na Coreia para a utilização em camadas de cobertura. Além disso, obteve-se condutividade hidráulica similar a de um solo argiloso de uso comum em aterro, entre $8,5 \times 10^{-6}$ e $5,4 \times 10^{-6}$ cm/s. Em relação à capacidade de escoamento de precipitações e a resistência à erosão obteve-se resultados melhores que do solo de granito frequentemente utilizados na Coreia do Sul.

Contudo, os autores concluíram que o uso do lodo de esgoto solidificado como material de cobertura pode ser satisfatório em termos econômicos e ambientais para o estudo realizado.

PRIM (2011) também realizou uma pesquisa que consistiu na utilização de solo argiloso, lodo de ETA e de ETE como material de cobertura de aterro. Durante o desenvolvimento da pesquisa a autora testou diferentes percentuais lodo/alcalinizante para definir o traço adequado de material para posterior uso em cobertura de aterro sanitário. Por fim, a autora concluiu que o uso da proporção 0,425:0,425:0,15:1 de ETA:ETE:CaO:Solo como material de cobertura intermediária de aterro não afeta adversamente na qualidade do lixiviado e que é viável economicamente e tecnicamente.

Em um estudo semelhante realizado por PIMENTEL (2012) foi avaliado o uso do lodo de ETE em camadas de cobertura de aterro. O autor utilizou 30% de cal virgem para a estabilização do lodo de forma a alcançar o padrão classe B estabelecido pelo CONAMA nº375 de 2006. Posteriormente, a partir de testes geotécnicos o autor concluiu que a proporção 1:1 de solo com lodo alcalinizado (30% de cal) é adequada para aplicação em sistemas de cobertura finais, porém, inviável em camadas drenantes ou de fundação. A outra etapa da pesquisa do mesmo autor consistiu no monitoramento do lixiviado gerado em três células de um piloto experimental com diferentes camadas de cobertura, durante 16 semanas. A célula referência C1 continha em sua cobertura solo argiloso natural, a C2 solo:lodo 30% e a célula C3 lodo estabilizado com 30% de cal.

Observou-se que os lixiviados das células que possuíam o lodo estabilizado apresentaram maiores valores de pH e alcalinidade devido à presença da cal. Em relação à DQO verificaram-se concentrações iniciais elevadas devido à influência da deposição inicial das camadas de cobertura. Posteriormente, ocorreu um decaimento significativo da última variável devido à influência da cal nas reações de metanogênese.

O autor ainda verificou que as concentrações de Zinco (Zn), Cobre (Cu), Cádmio (Cd), Níquel (Ni), Chumbo (Pb) ficaram abaixo do padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela Resolução do CONAMA nº 430 de maio de 2011.

4.4 LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

O lixiviado é o líquido originário da água infiltrada pela cobertura do solo de um aterro sanitário e da água que excede a capacidade de retenção da umidade dos materiais aterrados e percola através massa de

resíduos(TCHOBANOGLIOUS et al., 1993 apud CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

O volume do lixiviado é influenciado pelos seguintes fatores:

- a) clima local;
- b) tipo de cobertura dos resíduos;
- c) grau de compactação dos resíduos;
- d) capacidade dos resíduos em controlar a umidade;
- e) infiltração subterrânea (se não houver impermeabilização inferior). (Reichert, 2007).

Segundo Souto (2009) o lixiviado é resultante da combinação de três processos que ocorrem durante a operação do aterro: processos químicos, físicos e biológicos.

As fases da evolução do aterro influenciam na variação da quantidade e qualidade do lixiviado gerado ao longo do tempo (CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

As diferentes fases do aterro que envolvem todos os processos de degradação da massa de resíduos são (POHLAND; HARPER, 1985 apud CASTILHOS JUNIOR et al., 2003; SOUTO, 2009; REICHERT, 2007):

Fase do ajustamento inicial (I): Os resíduos são aterrados na célula e se dá o início do acúmulo da umidade . São identificadas as primeiras variações nos diferentes parâmetros de degradação dos resíduos.

Fase de Transição (II): Devido à ultrapassagem da capacidade de retenção de água na massa dos resíduos, formam-se os lixiviados. Durante a estabilização da massa dos resíduos, ocorre a passagem de condições aeróbias para anaeróbias. Ácidos graxos começam a aparecer e o meio começa a tornar-se redutor.

Fase da formação ácida (III): O nitrogênio e o fósforo são consumidos para o crescimento dos microrganismos e a influência do hidrogênio é detectada na natureza dos produtos intermediários em formação. Além disso, é verificado o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis no lixiviado que causa a queda do pH e conseqüente complexação dos metais.

Fase da Fermentação metanogênica (IV): Produtos intermediários que apareceram na fase ácida são transformados em metano e dióxido de carbono em excesso. A redução significativa da carga orgânica do lixiviado é acompanhada pelo aumento da produção do biogás.

Fase da maturação final (V): Ocorre a estabilização dos componentes orgânicos e conseqüente limitação do processo. O oxigênio e espécies oxidadas reaparecem lentamente e o potencial redox aumenta. Moléculas orgânicas dificilmente biodegradáveis são convertidas em moléculas como ácidos húmicos.

Durante a biodegradação da massa dos resíduos, a composição química do lixiviado apresenta grande variabilidade. Além do líquido percolado depender da natureza dos resíduos, também é influenciado pela idade do aterro e fatores climáticos. (REICHERT, 2007). A tabela 4 apresenta a composição do lixiviado gerado em aterros com diferentes idades.

Tabela 4 - Características físicas e químicas de lixiviados de acordo com a idade do aterro.

Parâmetros	Idade do Aterro (Anos)						
	0 a 5		5 a 10		10 a 15		> 20
DBO (mg/L)	10000 -	25.000	1000 -	4.000	50 - 1000	1.000	< 50
DQO (mg/L)	15000 -	40.000	10000 -	20.000	-	5.000	< 1000
NTK (mg/L)	1000 -	3.000	400 -	600	75 -	300	< 50
N-NH3 (mg/L)	500 -	1500	300 -	500	50 - 2000	200	< 30
SDT (mg/L)	10000 -	25.000	5000 -	10.000	-	5.000	< 1000
pH	3 -	6	6 -	7	7 -	7,5	7,5
Cálcio (mg/L)	2000 -	4.000	500 -	2.000	300 -	500	< 300
Sódio e potássio (mg/L)	2000 -	4.000	500 -	1.500	100 -	500	< 100
Ferro e magnésio (mg/L)	500 -	1.500	500 -	1.000	100 -	500	< 100
Zinco (mg/L)	100 -	200	50 -	100	10 -	50	< 10
Cloreto (mg/L)	1000 -	3.000	500 -	2.000	100 -	500	< 100
Sulfato (mg/L)	500 -	2.000	200 -	1.000	50 -	200	< 50
Fósforo (mg/L)	100 -	300	10 -	100			< 10

Fonte: EL-FADEL et al., (2002 apud PIMENTEL, 2012)

Segundo Reichert (2007) os aterros sanitários de acordo com a idade podem ser classificados como novos (<5 anos), médios (5-10 anos) e velhos (>12 anos).

Os lixiviados “novos” diferenciam-se dos lixiviados “velhos” pela alta concentração de matéria orgânica facilmente biodegradável e pH ácido. (SOUTO, 2009).

O clima local é o outro fator importante que influencia nas características físico-químicas do lixiviado. (SOUTO, 2009). Nesse

contexto, Souto e Povinelli (2007) realizaram um estudo dos lixiviados de aterros brasileiros com o objetivo de comparar com os aterros de regiões temperadas.

A tabela 5 apresenta as características identificadas pelos autores no estudo de lixiviados dos aterros brasileiros.

Tabela 5 - Composição típica dos lixiviados de aterros sanitários brasileiros.

(Continua)

Variável	Faixa Máxima		Faixa mais Provável		FVMP (%)
pH	5,7 -	8,6	7,2 -	8,6	78
Alcalinidade total (mg/L de CaCO ₃)	750 -	11.400	750 -	7.100	69
Condutividade (µS/cm)	2950 -	2.500	2950 -	17.600	77
DBO (mg/L de O ₂)	< 20 -	30.000	< 20	8.600	75
DQO (mg/L de O ₂)	190 -	80.000	190 -	22.300	83
Óleos e graxas (mg/L)	10 -	480	10 -	170	63
Fenóis (mg/L de C ₆ H ₅ OH))	0,9 -	10	0,9 -	4	58
NTK (mg/L de N)	80 -	3.100	Não há		-
N-amoniacal (mg/L de N)	0,4 -	3.000	0,4 -	1.800	72
N-orgânico (mg/L de N)	5 -	1.200	400 -	1.200	80
N-nitrito (mg/L de N)	0 -	50	0 -	15	69
N-nitrato (mg/L de N)	0 -	11	0 -	4	69
P-total (mg/L)	0,1 -	40	0,1 -	15	63
Sulfeto (mg/L)	0 -	35	0 -	10	78
Sulfato (mg/L)	0 -	5.400	0 -	1.800	77
Cloreto (mg/L)	500 -	5.200	500 -	3.000	72
Sólidos totais (mg/L)	3200 -	21.900	3200 -	14.400	79
Sólidos totais fixo (mg/L)	630 -	20.000	630 -	5.000	60
Sólidos totais voláteis (mg/L)	2100 -	14.500	2100 -	8.300	74
Ferro (mg/L)	0,01 -	260	0,01 -	65	67
Manganês (mg/L)	0,04 -	3	0,04 -	2	79
Cobre (mg/L)	0,005 -	1	0,05 -	0	61

(continuação)

Variável	Faixa Máxima	Faixa mais Provável	FVMP (%)
Níquel (mg/L)	0,03 -1	0,03-1	71
Cromo (mg/L)	0,003 -1	0,03-1	89
Cádmio (mg/L)	0 -0	0-0	67
Chumbo (mg/L)	0,01 -3	0,01-1	64
Zinco (mg/L)	0,01 -8	0,01-2	70

FVMP: frequência de ocorrência dos valores mais prováveis.

FONTE: SOUTO; POVINELLI (2007).

O volume de lixiviados produzidos nos aterros sanitários é fundamental para a definição do sistema de coleta, remoção de lixiviados e implantação de sistemas de tratamento de esgoto (CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

Segundo os mesmos autores, os fatores que influenciam nesse parâmetro são: precipitação na área do aterro, declividade e tipo do solo de cobertura, capacidade da camada superficial de reter água, capacidade de infiltração do material de cobertura e dos resíduos dispostos no aterro, capacidade de absorção dos resíduos sólidos.

5 METODOLOGIA

Neste capítulo é realizada uma breve caracterização do lodo oriundo da estação de tratamento de esgoto utilizado como material de cobertura no aterro sanitário experimental, incluindo o processo de tratamento do resíduo para o enquadramento dentro da literatura consultada por PIMENTEL (2012).

Também é descrita a metodologia usada para a instalação do aterro experimental, incluindo a caracterização dos resíduos sólidos urbanos coletados e de cada material usado como material de cobertura. Além disso, são apresentados os métodos empregados para a avaliação qualitativa do lixiviado coletado em cada célula.

Finalmente apresenta o método estatístico escolhido para a realização da correlação entre os parâmetros físico-químicos realizados.

5.1 CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DO LODO PROVENIENTE DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Esta foi a primeira etapa desenvolvida no projeto realizado por PIMENTEL(2012). As amostras de lodo foram obtidas pela coleta de lodo na Estação de Tratamento de Esgoto-Insular localizada no município de Florianópolis (SC), bairro Centro. A coleta foi realizada ao longo do ano 2010 e 2011 a fim de se analisar a qualidade do lodo estudando de forma detalhada a variabilidade do resíduo ao longo do tempo.

As análises referentes à determinação de ovos helmintos foram realizadas nos laboratórios de análises da ECONSULTING- Laboratório e Gestão Ambiental. As análises de pH, teor de Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, Metais Pesados, Carbono Orgânico Total, Matéria Orgânica, Umidade, Densidade, Nitrogênio Amoniacal, Teor de Cinzas, Ortofosfato, coliformes Fecais *Escherichia Coli*, foram analisadas nos laboratórios da UNESC –Universidade do Extremo Sul Catarinense, tomando como referência a metodologia descrita pela USEPA (1996), EPA (2003) e APHA (2005).

A **tabela 6** apresenta os resultados dos parâmetros analisados do lodo “*in natura*”

Tabela 6 - Caracterização detalhada do lodo “in natura”.

(continua)

Resultados Caracterização detalhada					
Parâmetros	<i>in natura</i> (jul/10)	<i>in natura</i> (fev/11)	<i>in natura</i> (abr/11)	<i>in natura</i> (jul/11)	<i>in natura</i> (nov/11)
pH em água 1:5 (1)	7,00	6,30	-	-	-
pH em CaCl ₂ (1)	6,60	5,90	6,56	7,08	7,21
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	12,68	12,59	13,94	12,43	11,87
Teor de Sólidos Fixos (%ST) (m/m) (2)	23,72	30,68	22,74	20,40	20,08
Teor de Sólidos Voláteis (%ST) (m/m) (2)	76,28	69,32	77,26	79,60	79,92
Carbono Orgânico (%) (m/m)	41,97	36,67	34,60	33,60	38,3
Matéria Orgânica (%) (m/m)	72,19	63,07	59,50	57,90	65,9
DQO (mg/g) (m/m)	1118,90	1149,40	-	-	-
Cinzas a 550°C (%) (m/m)	-	30,68	-	-	-
Nitrogênio Total (%) (m/m)	-	6,01	4,60	7,00	6,4
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	-	1,30	0,90	1,71	1,4
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	-	1,60	2,70	2,40	2,4
Fósforo (PO ₄) (%) (m/m)	-	4,90	1,50	2,00	1,5
Alumínio (Al) (%)	0,89	1,70	1,10	0,59	0,7
Cálcio (Ca) (%)	0,90	1,00	0,95	0,85	1,25
Magnésio (Mg) (%)	0,65	0,66	0,48	0,53	0,48
Arsênio (As) (mg/kg)	< 0,1	-	6,30	4,10	0,8
Bário (Ba) (mg/kg)	117,00	-	191,00	140,00	143,0
Mercúrio (Hg) (mg/kg)	0,30	-	1,20	1,60	0,7
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	3,00	-	< 5	24,60	< 5
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,00	-	14,00	13,00	16,0
Selênio (Se) (mg/kg)	< 0,1	-	6,30	1,00	0,8

(continuação)

Resultados Caracterização detalhada					
Parâmetros	<i>in natura (jul/10)</i>	<i>in natura (fev/11)</i>	<i>in natura (abr/11)</i>	<i>in natura (jul/11)</i>	<i>in natura (nov/11)</i>
Cobre (Cu) (mg/kg)	174,00	230,00	208,00	-	180,0
Zinco (Zn) (mg/kg)	550,00	560,00	515,00	484	500,0
Cádmio (Cd)(mg/kg)	< 1,0	0,90	0,70	0,50	< 0,01
Chumbo (Pb) (mg/kg)	25,00	22,00	26,50	17,70	22,0
Cromo (Cr) (mg/kg)	19,00	28,00	88,00	18,60	34,0
Umidade a $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$ (%)	86,40	85,73	84,94	86,84	87,8
Umidade a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ (%)	87,32	87,41	86,06	87,57	88,13
Densidade (g/cm^3) (1)	1,04	-	-	-	-

Fonte: PIMENTEL, 2012]

Após a comparação dos resultados com a literatura, iniciou-se a etapa de tratamento do lodo. Durante essa etapa de tratamento ocorreu a estabilização alcalina com a cal virgem e a secagem em estufa agrícola para enquadrar o lodo na classe B estabelecida pela Resolução CONAMA, nº 375 (BRASIL, 2006) e atingir umidade de 50% e 40% SV/ST requeridos em coberturas de aterros, segundo (GRIFFIN et al., 1996; GRANATO, 2011; SIMMONS 2003; PIETZ et al., 1996) citados por PIMENTEL (2012).

No processo da estabilização alcalina, a calagem do lodo foi realizada a aproximadamente 13% de sólidos totais, utilizando-se a cal virgem CaO com 30% do peso seco do lodo.

As características físico-químicas da cal escolhida para o processo de estabilização estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7.- Composição e Propriedades da Cal

Parâmetro	Percentual
Óxido de Magnésio (MgO);	35%
Sílica e Resíduo Insolúvel (SiO ₂ + RI)	3%
Carbonato Residual	8,30%
Anidrido Carbônico (CO ₂)	6,50%
Perda ao Fogo (PF)	9,80%
Água Combinada	3,30%
Granulometria # 18 (1,00 mm)	1,70%
Granulometria # 50 (0,30 mm)	18,20%
Umidade	0,60%

Fonte: PIMENTEL, 2012

Em seguida, o lodo caleado foi levado a uma estufa agrícola construída especificamente para a pesquisa. No decorrer do tratamento, foram coletadas amostras de lodo das três misturas realizadas na etapa da caleação com percentual de 15%, 30% e 45% para a determinação das seguintes análises: metais pesados, sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis, pH e umidade. Somente no final do monitoramento foram realizadas análises detalhadas de todas as misturas (0%,15%,30%,45%).

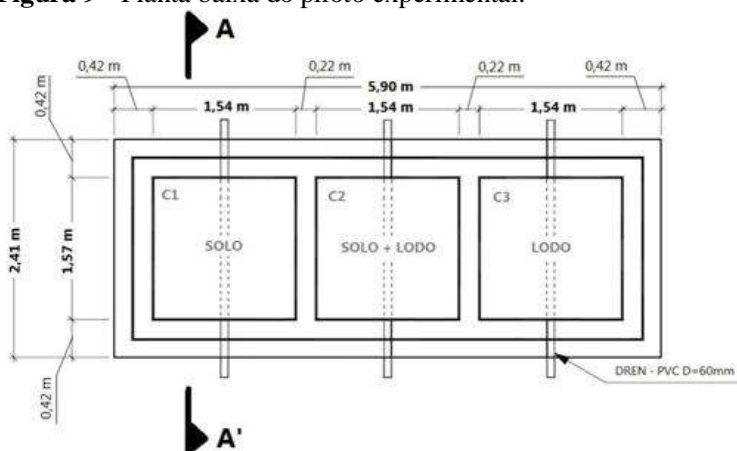
Os resultados obtidos das análises foram comparados com os valores de referencia relativos ao uso de lodo em camada de cobertura de aterro sanitário e com os valores do CONAMA nº 375. (BRASIL, 2006). PIMENTEL(2012) concluiu que com a adição de 30% de cal ao lodo e sua posterior secagem em estufa por aproximadamente 30 dias considerando reviramento 3 vezes por semana é suficiente para enquadrá-lo as critérios de aplicação em coberturas de aterros sanitário.

5.2 DESCRIÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO EXPERIMENTAL

O experimento piloto situa-se nas proximidades do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A estrutura experimental é constituída por três células feitas com blocos de concreto. Cada lisímero (célula) possui as dimensões 1,54 x 1,57 de base e 3,26 m de altura. Três tubos de drenagem com 60 mm de diâmetro e declividade de 3,5 % recolhem os líquidos percolados conduzindo-os para fora das células. A figura 9 apresenta as dimensões da estrutura em planta baixa.

Figura 9 - Planta baixa do piloto experimental.



Fonte: MEDEIROS et al.,2002

A espessura da camada de resíduos é de 1,20 m e de cobertura, 8 cm. Segundo Reichert (2007), a altura de uma célula varia de 2 a 5 m e a cobertura intermediária geralmente é de 0,20 m. Com base nesta proporção a altura da camada de cobertura do piloto (0,08)mm foi dimensionada.

Foi aplicada uma camada estrutural para minimizar as possíveis deformações causadas pelos recalques diferenciais dos resíduos e para aumentar a estabilidade da camada de cobertura.

A mesma era constituída por brita, grade elástica e manta geotêxtil. A brita foi aplicada para o nivelamento da massa de resíduos, a grade para dar estrutura à camada e a manta usada como barreira contra a passagem de finos de cobertura.

O material de cobertura utilizado para a primeira célula (C1), adotada como referência foi uma camada de solo argiloso natural. Este é oriundo de uma jazida localizada no Município de Governador Celso Ramos e já foi empregado como cobertura pela Empresa Proactiva (Biguaçu). Na segunda célula (C2) empregou-se uma camada com mistura de solo e lodo na proporção de 1:1 com base em recomendações da literatura de diversos autores (JAMAL, NORIEH, FARZADKIA, 2011; WILLIFORD et al.,2002; GRIFFIN et al.,1998; PAPIN e WEST,1999) citados por Pimentel (2012). E na terceira célula (C3) aplicou-se uma camada somente de lodo. Tanto para célula C2, quanto para a célula C3 o lodo utilizado foi selecionado por PIMENTEL tratado

com menor percentual de cal possível e atendendo os critérios de estabilidade- 30% de cal (em base seca).

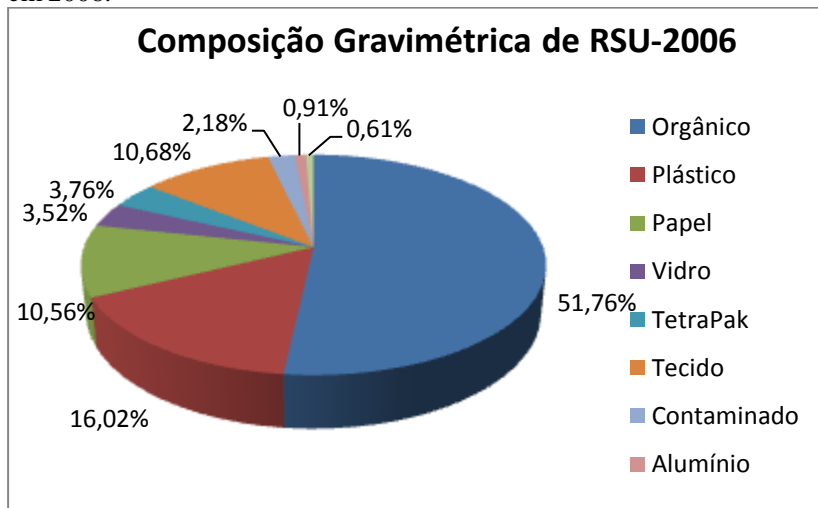
Figura 10 - Corte esquemático (A-A') das células do aterro experimental.



Fonte: PIMENTEL, 2012

Os resíduos utilizados em cada célula já estavam na estrutura desde 2006. Os mesmos foram coletados em Florianópolis-SC, no bairro canasvieiras e transportados até ao local do experimento por um caminhão coletor da Companhia de Melhoramentos da Capital (COMCAP). Em 2006 a composição gravimétrica dos resíduos era conforme o **gráfico 1**.

Gráfico 1 - Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos em 2006.



De 2006 a 2011 a estrutura ficou protegida e ocorreu a decomposição natural de grande parte dos resíduos sem a intervenção das intempéries. Em relação a essa etapa, foram tomados alguns cuidados antes da operação do piloto.

Inicialmente as tampas de proteção foram retiradas e deixou-se fluir livremente a água proveniente das chuvas durante uma semana, provocando saturação da massa de resíduos.

Posteriormente, inseriu-se à massa de resíduos com 600 ml de lodo anaeróbio. Esse inóculo utilizado foi coletado na estação de tratamento de efluentes da barra da lagoa, o mesmo era proveniente de um reator UASB (*Upflow anaerobic sludge blanket*) usado para o tratamento de esgoto doméstico. O volume do inóculo foi determinado através da **equação 1**.

$$V_{\text{recomendado}} = 200 \text{ ml}_{\text{lodo an.}} / \text{m}^3 \text{ resíduo}$$

(Equação 1)

A caracterização do lodo anaeróbio foi realizada em função dos seguintes parâmetros (PIMENTEL, 2012):

- sólidos totais(ST) = 12,37 gST/L
- sólidos fixos(SF) = 4,87 g SF/L
- sólidos voláteis (SV) = 7,5 g SV/L

- demanda química de oxigênio (DQO) = 14,2 g/L de O₂
- atividade metanogênica específica (AME) = 49,85 mg DQO-CH₄/g SSV.d

Após a inoculação do lodo na massa dos resíduos foi aplicada a camada estrutural explicada anteriormente e por fim em cada célula foi aplicada a camada de cobertura testada em etapas anteriores.

5.3 COLETA DE AMOSTRAS

Amostras de lixiviado foram coletadas uma vez por semana em cada célula do aterro experimental (**figura 11**), durante 322 dias. Nas primeiras semanas da pesquisa, o registro somente era aberto no momento da coleta da amostra. Porém, durante o monitoramento do volume do percolado verificou-se que ocorria vazamento dentro das células 2(solo+lodo30%) e 3(lodo30%) através da avaliação do volume gerado. Nesse sentido, no 217 ° dia decidiu-se deixar o registro diretamente aberto até o final da pesquisa, para se obter durante as coletas um volume suficiente do lixiviado para posterior análise dos parâmetros físico-químicos.

Figura 11 - Pontos de amostragem no piloto experimental



Fonte: PIMENTEL, 2012

As amostras eram coletadas em frascos com capacidade de 250 ml ou de 500ml, identificadas e transportadas até o Laboratório de Pesquisas de Resíduos sólidos (LARESO) onde eram armazenadas a aproximadamente 4 °C.

5.4 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICO UTILIZADOS PARA AVALIAR A QUALIDADE DO LIXIVIADO

A variação da composição do lixiviado de aterro sanitário é influenciada pelas características dos resíduos sólidos, camada de cobertura, quantidade e qualidade da água de infiltração, características hidrológicas e climáticas da região (Reichert, 2007).

Nesse sentido, torna-se necessária a análise dos parâmetros físico-químicos mais utilizados para caracterizar qualitativamente o lixiviado gerado em cada célula do aterro experimental em função das camadas de cobertura testadas.

Em cada amostra de lixiviado foram determinados os parâmetros descritos na tabela 8.

As mesmas análises foram realizadas em conformidade com as recomendações do Standard Methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2005).

Tabela 8 - Relação dos parâmetros físico-químicos e os respectivos métodos analíticos.

(continua)			
Parâmetro	Método Analíticos	Referência (APHA, 2005)	Frequência
pH	Potenciômetro	4500-H ⁺ B	1x/Semana
Alcalinidade total (mg/L de CaCO₃)	Titulométrico	2320 B	1x/Semana
DBO (mg/L de O₂)	Manométrico	5210 B	1x/Semana
DQO (mg/L de O₂)	Colorimétrico de Refluxo fechado	5220 D	1x/Semana
N-amoniaco (mg/L de N)	Destilação e Titulometria	4500 F	1x/Semana
N-nitrito (mg/L de N)	Colorimétrico	4500 B	1x/Semana
N-nitrato (mg/L de N)	Colorimétrico	4500 B	1x/Semana

(continuação)

Parâmetro	Método Analíticos	Referência (APHA, 2005)	Frequência
P-total (mg/L)	Colorimétrico- Vanadomolibdico	4500 C	1x/Semana
Sólidos totais (mg/L)	Método Gravimétrico	2540 B	1x/Semana
Sólidos totais fixo (mg/L)	Método Gravimétrico	2541 E	1x/Semana
Sólidos totais voláteis (mg/L)	Método Gravimétrico	2542 E EPA 3010	1x/Semana
Cobre (mg/L)	Absorção Atômica	A EPA 3010	Quinzenal
Níquel (mg/L)	Absorção Atômica	A EPA 3010	Quinzenal
Cádmio (mg/L)	Absorção Atômica	A EPA 3010	Quinzenal
Chumbo (mg/L)	Absorção Atômica	A EPA 3010	Quinzenal
Zinco (mg/L)	Absorção Atômica	A	Quinzenal

Obs: As análises de sólidos e metais foram realizadas pelo autor PIMENTEL (2012) durante seu período de pesquisa.

5.5 CLASSIFICAÇÃO DO EFLUENTE

A caracterização do lixiviado gerado nas diferentes células foi realizada de acordo com os limites definidos pela Resolução CONAMA nº 430 de Maio de 2011 (capítulo II), que estabelece padrões de lançamento de efluentes. Com base na mesma resolução foram comparadas as concentrações de Cd(Cádmio), Pb(Chumbo), Ni(Níquel), Zn(Zinco), Fe(Ferro), N-NH₃(Nitrogênio Amoniacal) e pH. Os demais parâmetros foram comparados à literatura descrita no capítulo da revisão bibliográfica.

5.6 OBTENÇÃO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS

As informações sobre a precipitação pluviométrica foram obtidas junto ao Laboratório de Energia Solar da UFSC (LEPTEN/LABSOLAR). A estação meteorológica localiza-se a aproximadamente 550 m da estufa.

5.7 TRATAMENTOS DOS DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliação dos resultados referentes aos parâmetros físico-químicos do lixiviado das células C1, C2, e C3, obtidos durante o experimento, foi desenvolvida análise estatística descritiva e inferencial dos dados. A estatística descritiva permitiu analisar uma série de dados proporcionando dessa forma uma visão geral da variabilidade dos mesmos, organizando e descrevendo por meio de tabelas, gráficos e diagramas.

E a análise inferencial foi também utilizada para comparar as médias dos grupos de dados utilizando a análise de variância(ANOVA) seguida pelo teste de Tukey.

5.7.1 Estatística Descritiva

Os resultados obtidos em cada análise físico-química do lixiviado receberam tratamento estatístico, utilizando estatística descritiva contendo em tabelas as médias, desvio padrão, valores de mínimo e de máximo.

A partir dos dados das tabelas foram elaborados gráficos e diagramas de caixa que mostravam o comportamento de cada parâmetro ao longo do tempo

Análise de Variância-ANOVA

A ANOVA é um procedimento que consiste na comparação de dois ou mais grupos/populações com distribuições normais. (MONTGOMERY; RUNGER, 2003 apud ALMEIDA, 2005). Através deste método pode-se testar a igualdade dos valores médios dos grupos de dados, verificando se diferem entre si de forma significativa. (HAIR, 2005). Trata-se de um teste estatístico que se baseia em duas hipóteses. (ALMEIDA, 2005):

- Hipótese nula (H_0): Não há diferenças significativas entre os grupos;
- Hipótese alternativa (H_1): Há diferenças significativas entre os grupos.

Os parâmetros do método ANOVA são apresentados na forma da tabela 9.

Tabela 9 -Tabela de Análise de Variância

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Teste F
Entre Grupos(G)	SQG	K-1	MQG	F=MQG/MQR
Dentro GruposUM	SQR	N-K	MQR	
Total	SQT	N-1		

Fonte: RIBEIRO; CATEN (2011)

Onde:

k-1: graus de liberdade do numerador (MQG)

N-k : graus de liberdade do denominador (MQR)

SQG:Soma dos quadrados do grupo

SQR:Soma dos quadrados do resíduo

SQT: Soma dos quadrados total

MQG:Quadrado médio dos grupos

MQR:Quadrado médio do resíduo

F= Razão entre as médias quadráticas

Segundo Montgomery e Runger (2003 apud ALMEIDA, 2005)

ANOVA faz uma análise da variabilidade total de um grupo de dados de duas formas distintas:

1. variabilidade dentro dos grupos: analisando a divergência de todos os valores em relação às médias dos grupos que pertencem.
2. Variabilidade entre os grupos: avaliando a discrepância entre as médias de vários grupos.

Para isto faz-se o teste F que é o quociente entre a estimativa da variância entre os grupos e a estimativa da variância dentro dos grupos (veja tabela 9).

O valor F calculado é comparado ao F crítico que é definido segundo o nível de significância e o número de graus de liberdade. (RIBEIRO; CATEN, 2011). Esta comparação permite a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0).

De acordo com os mesmos autores, se F calculado for maior que o F crítico, descarta-se a hipótese nula (H_0) de que não existe correlação entre as variáveis estudadas.

Este teste somente informa se há diferença significativa entre dois ou mais grupos, mas não identifica os grupos envolvidos. Para uma análise mais detalhada que permita descobrir quais os grupos deve-se realizar o teste *Tukey*.

Teste Tukey para comparação das médias

Para avaliar a magnitude de diferença entre as médias de dois tratamentos foi utilizado o teste TUKEY que possibilita a comparação entre os pares dos tratamentos. (CATAPRETA, 2008). De acordo com Larsen e Marx (1986 apud CATAPRETA, 2008) o teste baseia-se na diferença mínima significativa (d.m.s) Δ , ou seja, permite estabelecer a menor diferença de médias de amostras que deve ser tomada como estaticamente significativa, em determinado nível.

Essa diferença é dada por:

$$d.m.s=q. \sqrt{QMR/r} \quad \textbf{Equação 2}$$

onde:

d.m.s= valor da diferença mínima significativa ;

q = é um valor dado na tabela ao nível de significância estabelecido;

QMR = variância estimada dentro dos grupos;

r= número de repetições de cada tratamento.

Ainda neste teste, duas médias são estatisticamente diferentes toda vez que o valor absoluto da diferença entre eles for igual ou superior que a d.m.s. (CATAPRETA, 2008).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNIO-PH

O pH é um parâmetro influenciado pelos processos biológicos que ocorrem na massa dos resíduos e indica se o meio se encontra em condições ácidas, neutras ou alcalinas (SOUTO, 2009; BASSANI, 2010).

As médias obtidas para células C1, C2 e C3 foram respectivamente $6,65 \pm 0,23$ mg/L, $7,61 \pm 0,26$ mg/L e $7,09 \pm 0,31$ mg/L. Os valores das células C2 e C3 não se enquadram na faixa apresentada por El-Fadel *et al.* (2002 apud PIMENTEL, 2012) que varia entre 6 e 7. No entanto, somente a célula C1 se encontra dentro da faixa apresentada pelo mesmo autor.

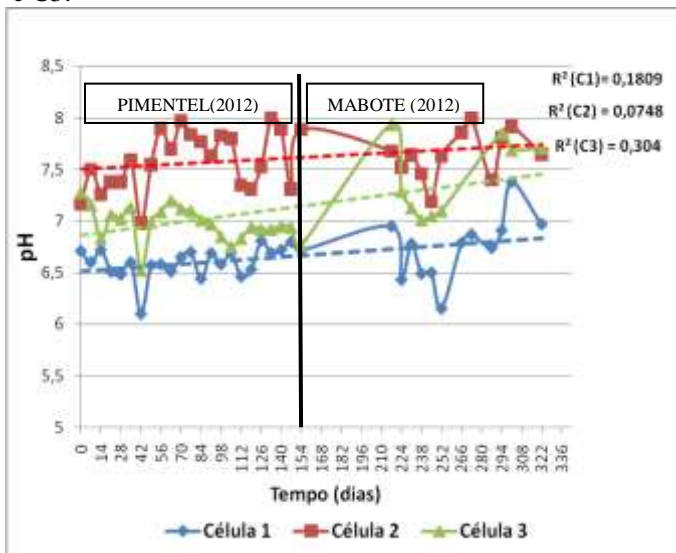
Verificou-se ainda, que as médias de todas as células estudadas encontram-se dentro da faixa de pH para aterros brasileiros na fase metanogênica, apresentada por Souto (2009), que fica entre 5,9 e 9,2.

No estudo similar a este, realizado por Rhew e Barlaz (2005), mas com reatores de 4 L (3,2 L de resíduos urbanos e 0,8 L de cobertura) os autores obtiveram resultados similares. Estes autores verificaram que a presença da cal ou lodo nos reatores levou ao aumento do pH, pois a cal forneceu alcalinidade, resultando no aumento da fase metanogênica. Segundo os mesmos autores, o pH aumentou nos reatores onde foi produzido o metano. Porém, Prim (2011) em sua pesquisa que consistiu na comparação dos reatores R1 (com cobertura de LETE+LETA+15% de cal) e R2 (cobertura de solo argiloso), não observou o aumento do pH no reator R1.

Sendo assim, esperava-se que a célula (C3) fosse apresentar maior pH devido a maior proporção de cal aplicada na mistura com lodo. Segundo PIMENTEL (2012) esse resultado pode ter sido influenciado pela permeabilidade do material de cobertura usado. Nos testes geotécnicos realizados foi observado que o lodo utilizado no experimento apresentava as mesmas características granulométricas que o solo. Portanto, a água atravessa rapidamente pela camada de cobertura e não fica muito tempo em contacto com o lodo tratado com a cal.

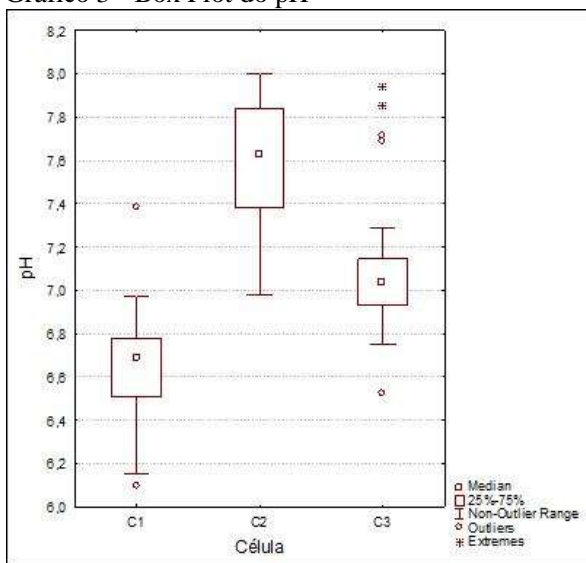
O gráfico 2 apresenta o comportamento do pH ao longo do tempo e diagramas de caixa são apresentados no gráfico 3.

Gráfico 2 - Variação do pH ao longo do tempo nas células C1, C2 e C3.



Fonte: Elaborado pela Autora

Gráfico 3 - Box Plot do pH



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em períodos de precipitação baixa (0mm), conforme registros apresentados no apêndice C, foram verificadas concentrações altas e baixas nas células C2 e C3. Na semana anterior ao 245º dia em que a precipitação acumulada foi alta, verificou-se pequeno acréscimo do valor do pH na célula C3. Após esse dia as concentrações voltaram a oscilar em dias de precipitação baixa(0mm).

No entanto, a precipitação não interferiu de forma significativa na variação dos valores de pH. Através do teste ANOVA foram verificadas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as células experimentais ($F = 110,29$; $p = 0,00$).

O teste Tukey comprovou haver diferenças significativas (para significância de 5%) entre as células C2 e C3. Torna-se evidente que as diferenças da percentagem de lodo das células C1 e C2 influenciaram no parâmetro pH. A tabela 10 abaixo mostra os resultados obtidos pelo teste tukey.

Tabela 10 - Teste Tukey

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,000105	0,000105
C2	-	-	0,000105

Obs: Em Cinza as diferenças significativas

Fonte: Elaborado pela Autora

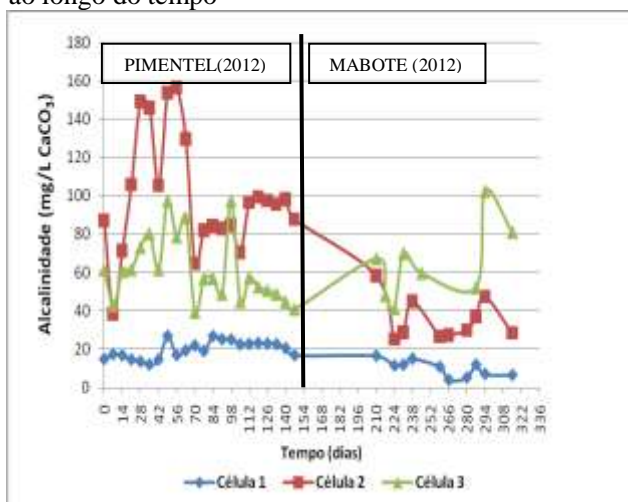
6.2 ALCALINIDADE

As células C1, C2 e C3 apresentaram, respectivamente, as seguintes médias: $16,80 \pm 6,35$ mg/L; $79,44$ mg/L $\pm 39,75$; $62,24 \pm 17,97$ mg/L. No entanto, a média das concentrações encontram-se abaixo do valor mínimo de alcalinidade de lixiviados de aterros brasileiros na fase metanogênica, relatada por Souto (2009), de 125 mg/L.

As células C2 e C3 apresentaram valores próximos, enquanto a célula C1 apresentou valores significativamente inferiores àquelas células. Os valores de alcalinidade da célula C2 variaram entre 25,20 mg/L e 156,30 mg/L; e os da célula C3 encontraram-se entre 39,25 e 102,50 mg/L.

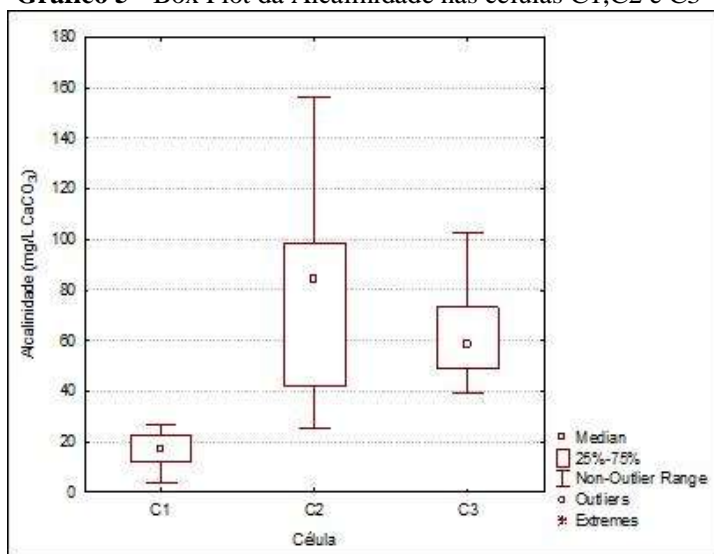
A gráfico 4 apresenta a variação desta variável ao longo do tempo; e diagramas de caixa de alcalinidade das células C1, C2 e C3 são apresentados na gráfico 5.

Gráfico 4 - Variação da alcalinidade nas células experimentais ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pela Autora

Gráfico 5 - Box Plot da Alcalinidade nas células C1,C2 e C3



Fonte: Elaborado pela Autora

No período em que foram alteradas as condições da coleta, as três células apresentaram o mesmo comportamento, como pode ser visualizado no gráfico 4. A mudança das condições de solubilização do lixiviado neste período provavelmente favoreceu o decréscimo da variável nas células C3 e C2.

Ainda no mesmo período, verificou-se que em dias de precipitações pluviométricas baixas (**figura12**) as células C3 e C2 apresentaram concentrações elevadas e baixas. Era de esperar que as concentrações baixas fossem encontradas somente nos dias de maior precipitação. (FERREIRA, 2010). No entanto, a precipitação não influenciou na variação da alcalinidade nas células que continham lodo e cal (C3, C2).

O teste ANOVA comprovou que há diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias gerais das três células ($F = 97,82$; $p = 0,00$).

Do mesmo modo, ao comparar as células pelo teste Tukey, verificou-se pelos resultados apresentados na tabela 11 que as C2 e C3 apresentaram diferenças significativas.

Tabela 11.- Teste Tukey

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,000022	0,000022
C2	-	-	0,003271

Obs: Em cinzento as diferenças significativas

Fonte: Elaborado pela Autora

Os resultados mostram que nas células C2 e C3, a proporção de lodo aplicada influencia na alcalinidade do lixiviado.

6.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO-DQO

As células C1, C2 e C3 apresentaram seguintes médias da DQO: 319,68; 796,95 mg/L e 778,53 mg/L. No entanto as médias gerais ficaram abaixo dos valores de DQO para aterros entre 5 e 10 anos de idade que se encontram na faixa apresentada por El-Fadel et al. (2002 apud PIMENTEL, 2012), de 10.000 a 20.000 mg/L.

Pode-se verificar que concentrações baixas de DQO foram encontradas na célula C1(solo), que variaram entre 735,45 mg/L e 38,10 mg/L. Assim, o valor mínimo encontra-se enquadrado na média mínima

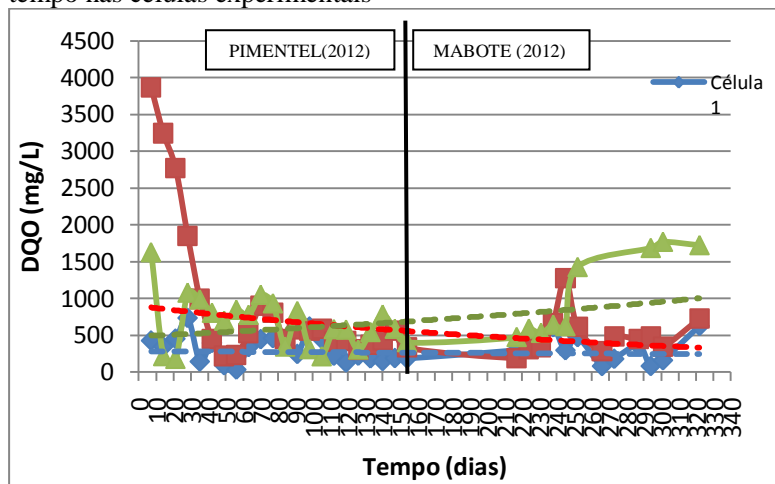
dos lixiviados brutos brasileiros na fase metanogênica, tabelada por Souto (2009), de 20 mg/L.

Rhew e Barlaz (1995), em estudo semelhante descrito no subitem 4.3.1.1 observaram comportamento semelhante à célula C2, nos reatores que continham lodo estabilizado ou cal na cobertura. No início do experimento dos mesmos autores, os valores eram elevados e seguidamente ocorreu um decréscimo da DQO nos reatores que continham Lodo caleado ou cal. Além destes dois autores, Prim (2011), fez uma comparação da DQO entre um reator que possuía camada de cobertura com LETE+LETA+15% de cal (R1) e outro que somente tinha solo (R2) como seu material de revestimento. Neste estudo a autora verificou que no reator que tinha lodo e cal (R1) ocorreu a maior oscilação da concentração de DQO, comportamento também verificado neste experimento.

A alteração das condições de solubilização do lixiviado no 217º dia pareceu influenciar na variação das concentrações da variável nas células C2 (lodo 30% +solo) e C3 (lodo 30% caleado), conforme pode-se verificar no gráfico 6. A concentração mais alta na célula C2 foi observada no 1º dia do experimento e na célula C3 no 301º dia. Do 266º ao 301º dia, a precipitação pluviométrica não variou e foi de 0 mm (vide APÊNDICE C). No entanto, este fator climático não contribuiu ao acréscimo da DQO na célula C3. Esperava-se que as células C2 e C3 fossem apresentar concentrações baixas da DQO nos dias de maior precipitação pluviométrica.

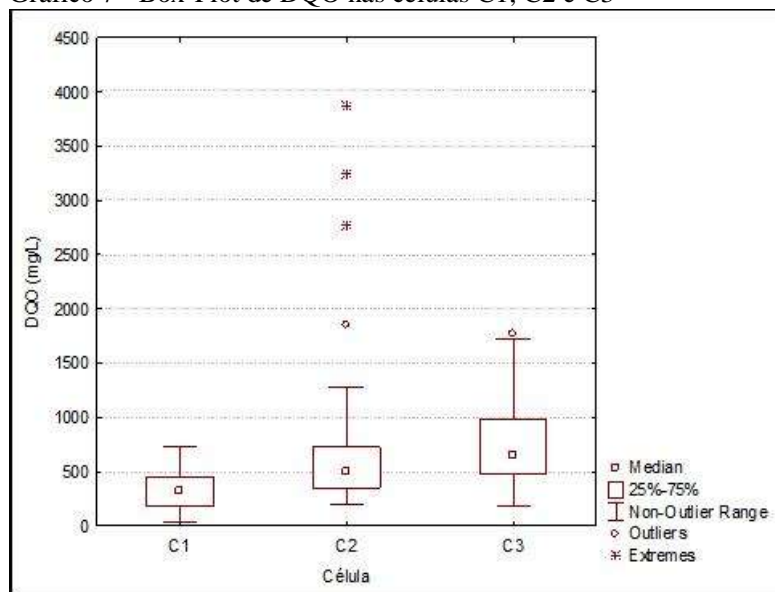
Através dos gráficos 6 e 7 pode ser visualizada a variação da DQO durante o período do monitoramento e a diferenças entre as células.

Gráfico 6 - Comportamento do parâmetro DQO ao longo do tempo nas células experimentais



Fonte:Elaborado pela Autora

Gráfico 7 - Box-Plot de DQO nas células C1, C2 e C3



Fonte :Elaborado pela Autora

O teste ANOVA comprovou que há diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias gerais das três células ($F = 16,86$; $p = 0,000005$).

Entretanto, o teste TUKEY demonstrou não haver diferenças significativas entre as células C2 e C3, como também pode ser verificado através da tabela 12.

Tabela 12 -. Teste Tukey

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,000055	0,000023
C2	-	-	0,745854

Obs: Em cinzento as diferenças significativas

Fonte: Elaborado pela Autora

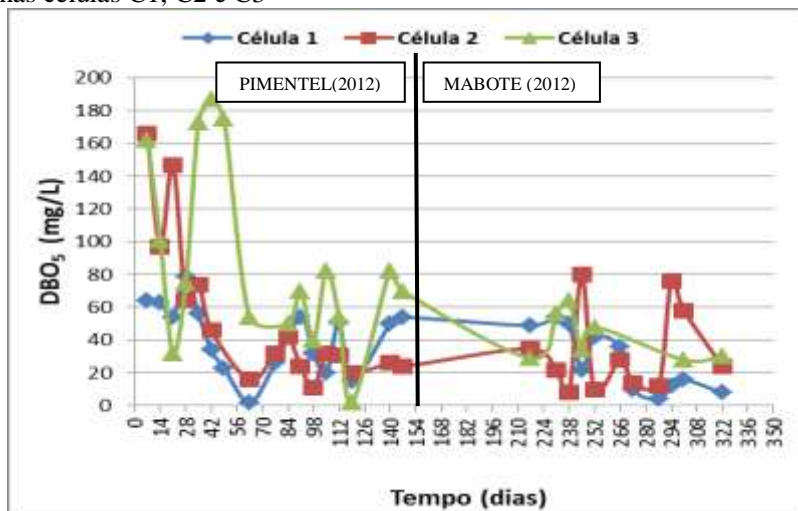
Os resultados apresentados na tabela 12 indicam que não houve diferença significativa entre as células C2 e C3 em função do percentual do lodo. Isto é, a influência da DQO é a mesma nas duas células independentemente do percentual do lodo aplicado em camada de cobertura.

6.4 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO-DBO₅

As médias obtidas da demanda bioquímica de oxigênio nas células C1, C2 e C3 foram: 36,29 mg/L; 45,15 mg/L e 73,83 mg/L. Verificou-se que todas as médias das concentrações de DBO₅ não se enquadram na faixa dos aterros entre 5 e 10 anos apresentada por El-Fadel et al. (2002 apud PIMENTEL, 2012), que varia de 1.000 a 4.000 mg/L. Porém, os mesmos valores encontram-se dentro da faixa para aterros brasileiros na fase metanogênica, tabelada por Souto (2009), que varia entre 3 e 17.200 mg/L. Ainda foi verificado através da tabela apresentada por Souto e Povinelli (2007), que as concentrações médias de DBO das células encontram-se dentro da faixa mais provável que varia de 20 a 86.000 mg/L para 75% dos casos.

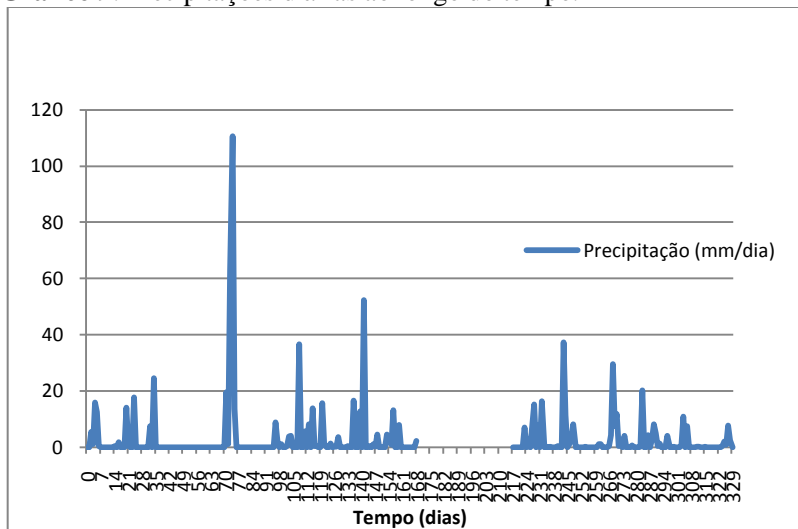
Os Gráficos 8 e 9 apresentam o comportamento da variável DBO₅ do lixiviado produzido nas células C1, C2 e C3 e os diagramas de caixa.

Gráfico 8- comportamento da variável DBO_5 do lixiviado produzido nas células C1, C2 e C3



Fonte: Elaborado pela Autora

Gráfico 9. Precipitações diárias ao longo do tempo.



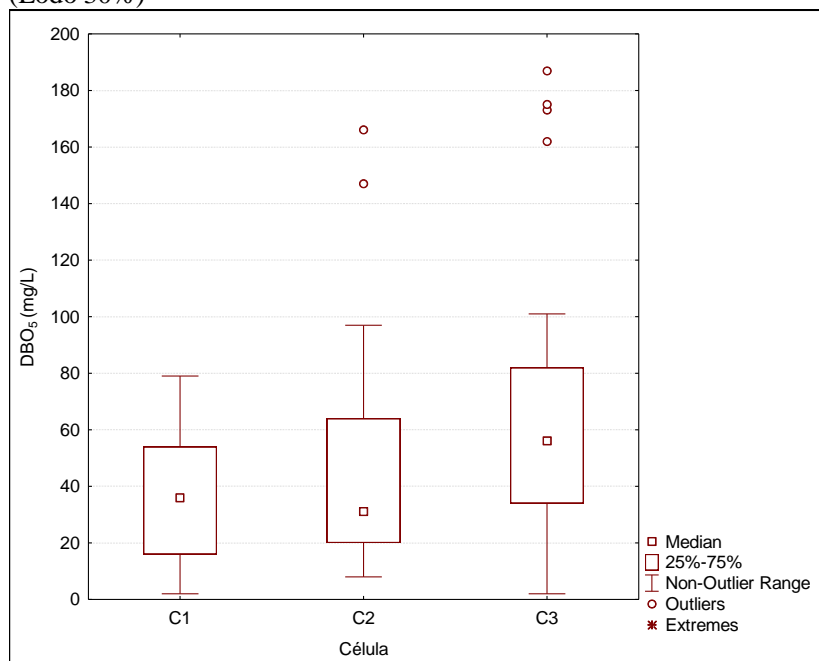
Do 42° ao 63° foi verificada uma queda significativa da DBO_5 acompanhada por grandes oscilações da precipitação pluviométrica.

Após este intervalo, os valores da variável apresentaram variações menores até o final do experimento. No entanto, a deposição inicial das camadas de cobertura influenciou nas concentrações iniciais da variável.

A partir do 217º dia, verificou-se que os valores da DBO₅ na célula C3 foram menores em períodos de maior precipitação e maiores em períodos de menor precipitação, portanto este fator climático influenciou nas concentrações do parâmetro DBO₅ da mesma célula.

Segundo BASSANI (2010) a água da chuva que entra na massa dos resíduos, faz com que a diluição da concentração da DBO₅ no lixiviado seja reduzida, efeito verificado neste experimento.

Gráfico 10 - Box Plot da DBO₅ em C1(Solo), C2(Solo+lodo 30%) e C3 (Lodo 30%)



Fonte: Elaborado pela Autora

O teste estatístico ANOVA comprovou que há diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias gerais das três células ($F = 6,0325$; $p = 0,003721$).

Contudo o teste TUKEY, revelou que há diferenças significativas entre as células C2 e C3, mas não há diferença significativa entre C1 e C2 (tabela 13).

Tabela 13 - Comparação de Médias par a par (Teste Tukey)

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,629149	0,003411
C2	-	-	0,040173

Obs: Em cinza os valores que indicaram diferença significativa

Fonte: Arquivos da Autora.

Os resultados obtidos na tabela demonstram que o percentual de lodo aplicado nas células C2(50%) e C3(100%) interfere nas concentrações da DBO₅ no lixiviado.

Os resultados mostram que o uso do lodo alcalinizado como material de cobertura contribui ao aumento da dissolução dos compostos orgânicos facilmente biodegradáveis na água de percolação.

6.5 RELAÇÃO DBO₅/DQO

Segundo Reichert (2007) esta relação é usada para determinar o percentual da matéria orgânica biodegradável. O mesmo autor ainda afirma que o índice desta relação diminui durante a evolução do aterro; inicialmente varia de 0,5 a 0,8 e após vários anos encontra-se na faixa de 0,07 a 0,08.

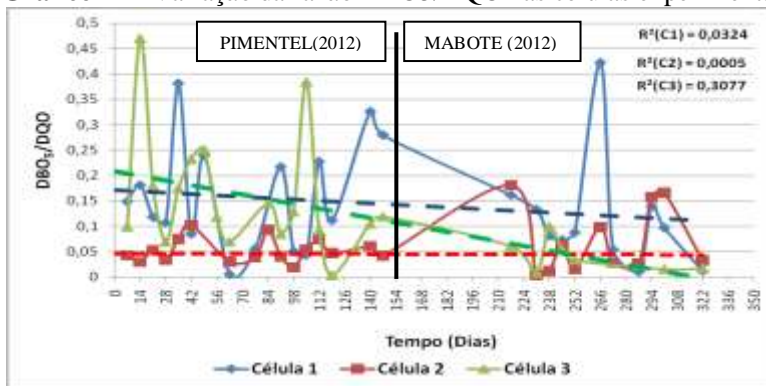
Os resultados das médias da relação DBO₅/DQO para as células C1, C2 e C3 foram respectivamente 0,143 ; 0,060 e 0,126. Segundo SOUTO (2009), os aterros que se encontram na fase metanogênica estável apresentam a composição DBO₅/DQO próxima de 0,1. Sendo assim, pode-se observar que todas as médias das células encontram-se próximas daquele valor. Isto comprova que no aterro encontram-se presentes ácidos húmicos e fúlvicos que não são facilmente biodegradáveis. (FERREIRA, 2010). Além disso, através do gráfico 10 observa-se que as células C1 e C3 apresentaram tendência decrescente em relação a esta variável exceto a célula C2 que permaneceu estável.

Na célula C3 encontraram-se maiores variações da relação DBO₅/DQO e seus valores variaram de 0,0034 a 0,471. Isto comprova a presença de uma parcela de matéria orgânica biodegradável que ainda não foi consumida na mesma célula. (SOUTO, 2009). Neste caso, a tal

parcela é provavelmente oriunda do lodo de esgoto presente na cobertura da célula.

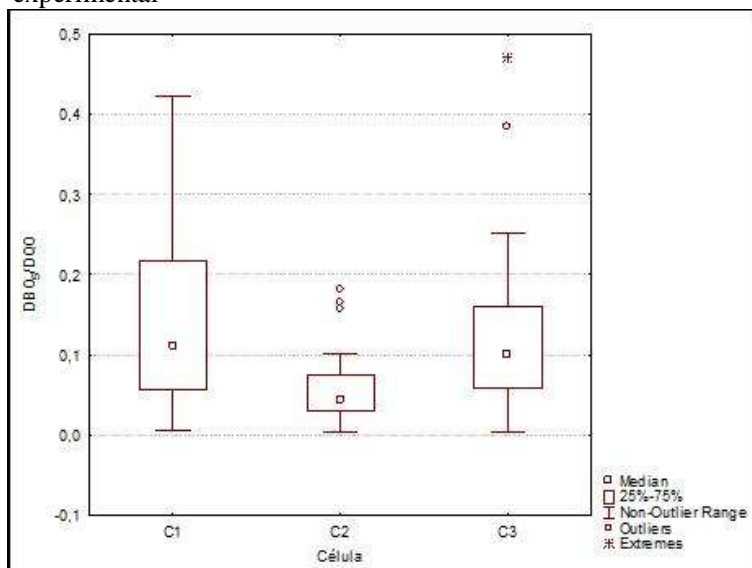
Os gráficos 11 e 12 apresentam o comportamento deste indicador nas células C1(solo), C2(solo+lodo) e C3(lodo 30%).

Gráfico 11 - Variação da razão DBO₅/DQO nas células experimentais



Fonte: Elaborado pela Autora

Gráfico 12 - Box Plot da relação DBO₅/DQO das células do piloto experimental



Fonte: Elaborado pela Autora

O teste ANOVA demonstrou haver diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as células ($p = 0,002872$; $F = 6,3274$).

Contudo pelo teste tukey (tabela 14) ao nível de 5% de probabilidade, comprovou-se que a diferença na quantidade de lodo utilizada em camada de cobertura as células C2(50% de lodo) e C3 (100% de lodo) influenciou no parâmetro DBO_5/DQO .

Tabela 14 - Teste Tukey

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,002703	0,622361
C2	-	-	0,048286

Obs: Em cinzento os valores que indicaram diferença significativa

Fonte: Elaborado pela Autora

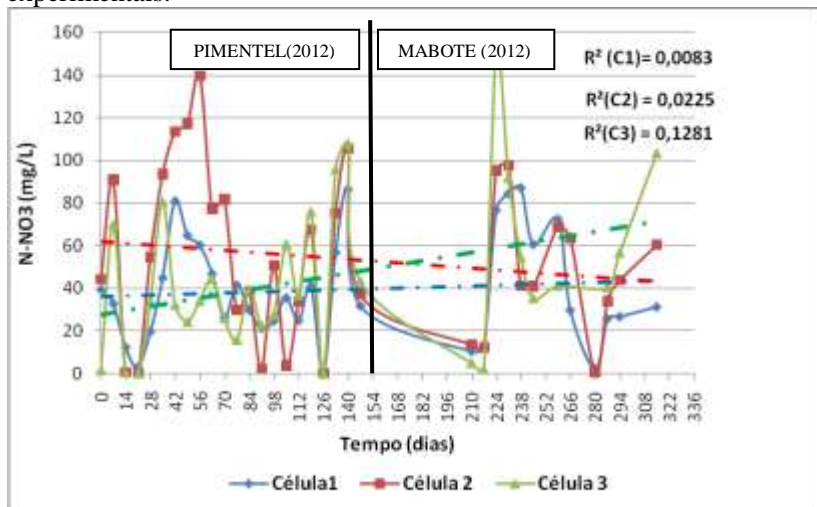
6.6 NITRATO E NITRITO

As concentrações médias do parâmetro N-NO_3^- para células C1, C2 e C3 foram, respectivamente, 40,82 mg/L; 55,49 mg/L e 46,98 mg/L. Segundo SOUTO (2009), lixiviado de aterros brasileiros que se encontram na fase metanogênica possuem variação 0 a 270 mg/L de nitrato sendo, que em 90% dos aterros o parâmetro assume valores menores que 100 mg/L. Entretanto, as concentrações médias das células estão dentro da fixa apresentada pelo mesmo autor.

No 35º, 140 º e 231º dia, a concentração de nitrato nas células C1, C2 e C3 sofreu um aumento significativo (Gráfico13). No 231º dia a concentração da variável na célula C3 atingiu o pico mais alto, provavelmente devido a precipitação acumulada dos dias anteriores. Além disso, nessa data a alteração da metodologia da coleta descrita no item 5.3 pode ter influenciado na mudança significativa da concentração de NO_3^- na célula C3.

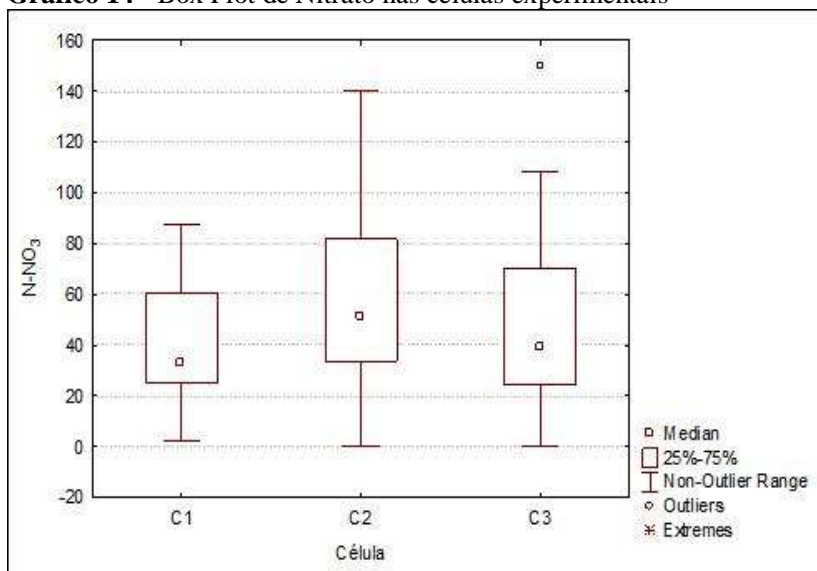
As células C2 e C3 apresentaram picos mais altos de concentração de nitrato em relação a C1 conforme pode ser observado no gráfico 13. Porém, Prim (2011) não obteve o mesmo resultado em seu experimento. No estudo desenvolvido pela autora o reator que continha lodo de ETA e de ETE estabilizado com cal teve poucas oscilações de NO_3^- em relação ao reator que continha somente solo argiloso em sua camada de cobertura.

Gráfico 13 Variação temporal da concentração de Nitrato nas células experimentais.



Fonte: Elaborado pela Autora

Gráfico 14 - Box Plot de Nitrato nas células experimentais



Fonte: Elaborado pela Autora

O teste ANOVA mostrou não haver diferença estatisticamente significativa ($p > 0,05$) entre as médias gerais das células do piloto experimental ($p = 0,089941$; $F = 2,4308$).

Apartir do teste Tukey à probabilidade de 5%, constatou-se que realmente não há diferença significativa entre as células C2 e C3. Independentemente da maior quantidade de lodo aplicada na célula C3, as células C2 e C3 permaneceram iguais em função do parâmetro N-NO_3^- .

Tabela 15 - Teste Tukey de N-NO_3

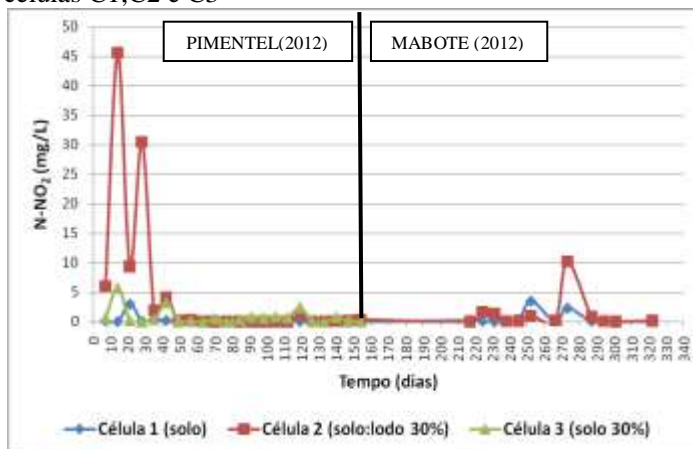
Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,073437	0,404008
C2	-	-	0,663129

Fonte: Elaborado pela Autora

Em relação à presença de nitrito no lixiviado, todas as concentrações médias de N-NO_2^- enquadram-se na faixa dos aterros brasileiros na fase metanogênica que fica entre 0 e 70 mg/L, relatada por Souto(2009); sendo que em 90% dos aterros a variável apresenta valores abaixo de 40 mg/L. No entanto as médias das células C1, C2 e C3 foram, respectivamente, 0,35 mg/L; 3,52 mg/L e 1,084 mg/L.

Do 1° ao 42° dia a célula C2 apresentou variações significativas dos valores de N-NO_2^- que oscilaram de 3,28 a 45,63 mg/L. Do 35° ao 266° dia as células C2 e C3 apresentaram concentrações próximas de 0 mg/L. Nesse período foram observadas pequenas oscilações de N-NH_3 , porém as concentrações de N-NO_3^- apresentaram-se ligeiramente elevadas.

Gráfico 15 - Variação temporal da concentração de nitrito nas células C1,C2 e C3



Fonte:Elaborado pela Autora

Entre o 266° e 273° dia, foi verificado novamente o aumento da concentração de nitrito na célula C3.

Prim (2011) em seu experimento obteve um comportamento diferente da concentração de nitrito no reator R1 que possuía mistura de lodo de ETA 15% +lodo de ETE 15%+Solo argiloso. Durante o experimento da autora ocorreu um decréscimo da concentração de nitrito do 1° dia até o final do experimento.

6.7 NITROGÊNIO AMONIAL (N-NH₃)

Segundo Catapreta (2010), nitrogênio amoniacal é o parâmetro mais importante da série nitrogenada para a análise do lixiviado.

As concentrações médias obtidas da variável NH₃ nas células C1, C2 e C3 foram, respectivamente 2,73 mg/L; 10,47 mg/L; 25,47 mg/L. De acordo com El-Fadel et al. (2002 apud PIMENTEL, 2012) a faixa da variável NH₃ para aterros de 5 a 10 anos varia entre 300 e 500 mg/L. No entanto, os valores obtidos no experimento não se encontram dentro da faixa relatada pelo mesmo autor.

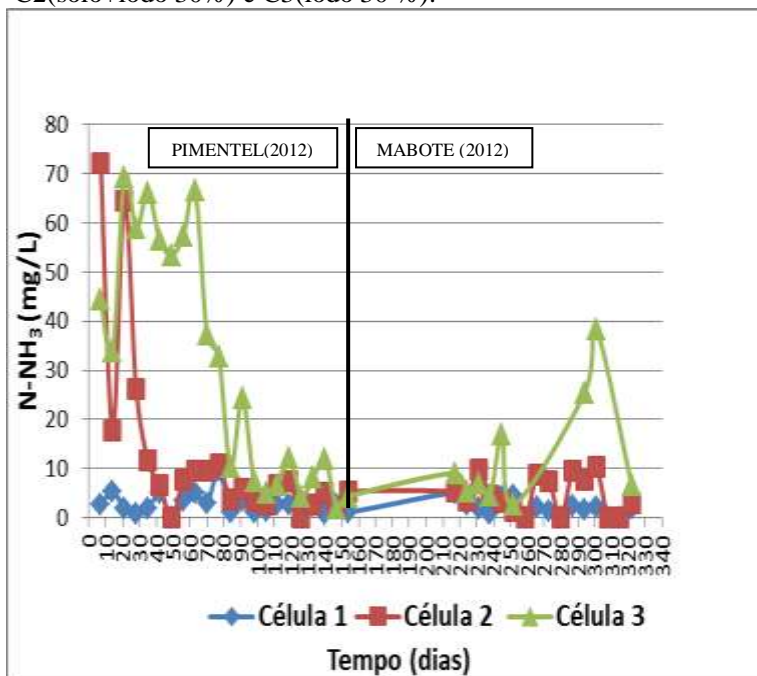
Pelos resultados verifica-se que a célula C3 encontra-se acima do limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA n° 430 de maio de 2011, de 20 mg/L.

O lixiviado gerado na célula C3 apresentou valores elevados de NH₃ do 1° ao 63° dia. Do 63° ao 84° dia pode ser visualizado no gráfico

16 que ocorreu um decréscimo significativo dos valores da mesma variável. Do 217 ° dia até o final do experimento os resultados apresentaram-se abaixo de 20 mg/L exceto no 294° e 301° dias.

Rhew e Barlaz (1995) obtiveram em seu experimento resultados similares. Nos primeiros dias os reatores que possuíam cal ou LTC na camada de cobertura apresentaram valores altos de N-NH₃ e ao longo do experimento foi observada a redução da variável até o final do monitoramento. Porém, Prim (2011) não obteve diferenças significativas entre o reator que continha mistura de solo com lodo de ETA e de ETE estabilizados com 15% de cal e o que possuía somente solo. Do início ao fim da pesquisa a autora observou o mesmo comportamento nos dois reatores.

Gráfico 16 - Comportamento do N-NH₃ nas células C1(solo), C2(solo+lodo 30%) e C3(lodo 30 %).



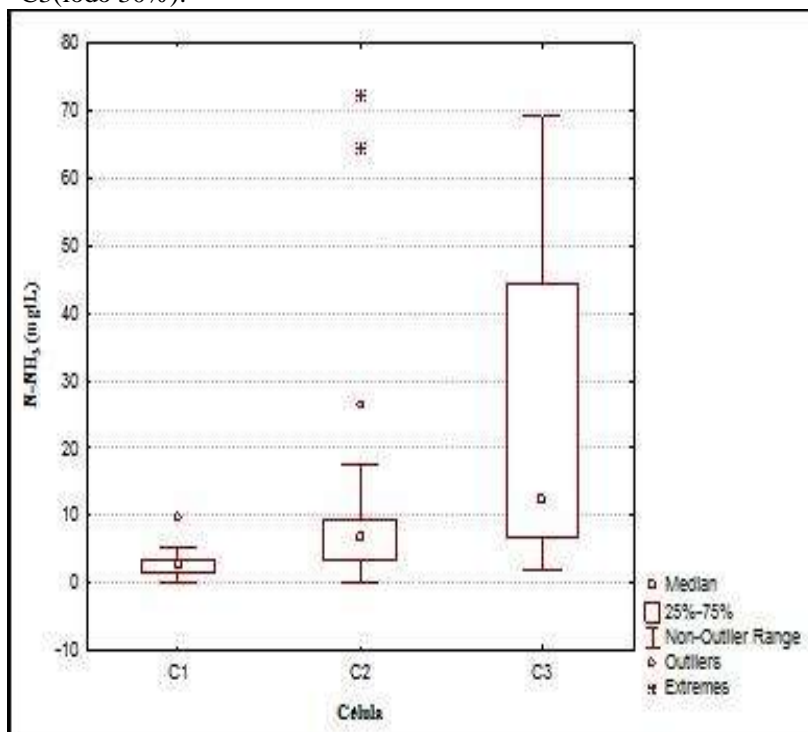
Fonte: Arquivos da Autora

Observando o gráfico 16 verifica-se que as concentrações de nitrogênio amoniacal na célula C2 também apresentaram grandes oscilações. As concentrações médias tenderam a redução, chegando a

decair para 0 mg/L no 49º dia. Esse fenômeno pode estar ligado ao processo de volatilização da amônia por *stripping*, ocasionado pelos maiores valores de alcalinidade e pH verificados no lixiviado da célula C2 e C3.

Através do diagrama de caixa (Gráfico 17), podem-se visualizar as diferenças entre as células experimentais.

Gráfico 17 - Box Plot de N-NH_3 em C1(solo), C2(solo+lodo 30%) e C3(lodo 30%).



Fonte: Arquivos da Autora

O teste ANOVA demonstrou que há diferença estatisticamente significativa entre as células experimentais C1, C2 e C3 ($P = 0,00$ e $F = 55,2831$).

Sendo assim, o teste Tukey (Tabela 15) comprovou haver diferenças significativas entre as células C2 e C3.

Tabela 16 - Teste Tukey

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,004931	2,1E-05
C2	-	-	2,2E-05

Em cinza os valores que indicaram diferença significativa

Fonte: Arquivos da Autora

As conclusões de análise estatística de Tukey indicam que a proporção de lodo estabilizado aplicado em material de a cobertura no aterro experimental, influencia de forma significativa na concentração de N-NH_3 no lixiviado.

6.8 FÓSFORO TOTAL

No primeiro dia do experimento, as três células apresentaram concentrações altas. As concentrações médias de fósforo total obtidas das células C1, C2 e C3 foram, respectivamente, 15,61mg/L; 40,14 mg/L e 35,70 mg/L. Os dados obtidos estão em conformidade com a faixa apresentada por El-Fadel para aterros de 5 a 10 anos, que varia entre 10 e 100 mg/L.

As células C2 (Solo+Lodo 30%) e C3(Solo 30%) apresentaram maiores valores da variável em relação às células C1 (Solo). As concentrações de fósforo detectadas na célula C2 variaram entre 3,33 mg/L e 146,50 mg/L; enquanto que na célula C3 os valores encontraram-se na faixa de 2,52 a 157,66mg/L.

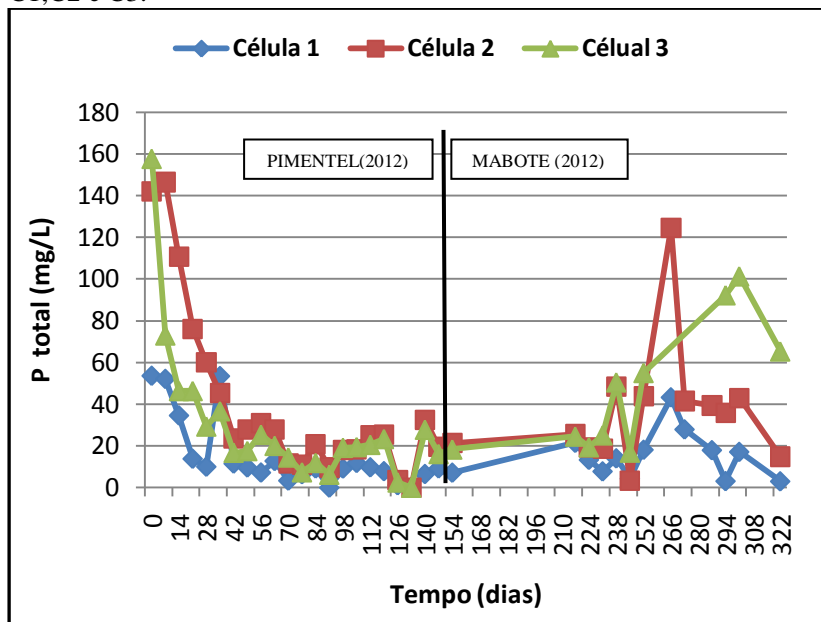
Após o primeiro dia do experimento observou-se uma queda das concentrações de fósforo total nas células C2 e C3 (Gráfico 18). Isto mostra que o lodo usado como material de cobertura, influenciou nas concentrações iniciais de fósforo total devido à presença de matéria orgânica.

O decaimento indica que ao longo do experimento, a cal contribuiu à liberação de fósforo posteriormente consumido durante à degradação da matéria orgânica dentro das mesmas células.

Rhew e Barlaz (1995) verificaram o mesmo comportamento de fósforo total nos reatores que continham LTC ou cal. No início do experimento as concentrações nos mesmos reatores apresentaram valores altos e ao longo do experimento ocorreu um decaimento da variável acompanhado por níveis elevados de pH. Segundo os autores, esse efeito de redução pode estar relacionado à presença de metais e cal.

Isto é, os fosfatos agem como tampão alcalino (Souto, 2009), contribuindo deste modo à sua complexação com a presença da cal.

Gráfico 18 - Variação da concentração de fósforo total nas células C1,C2 e C3.

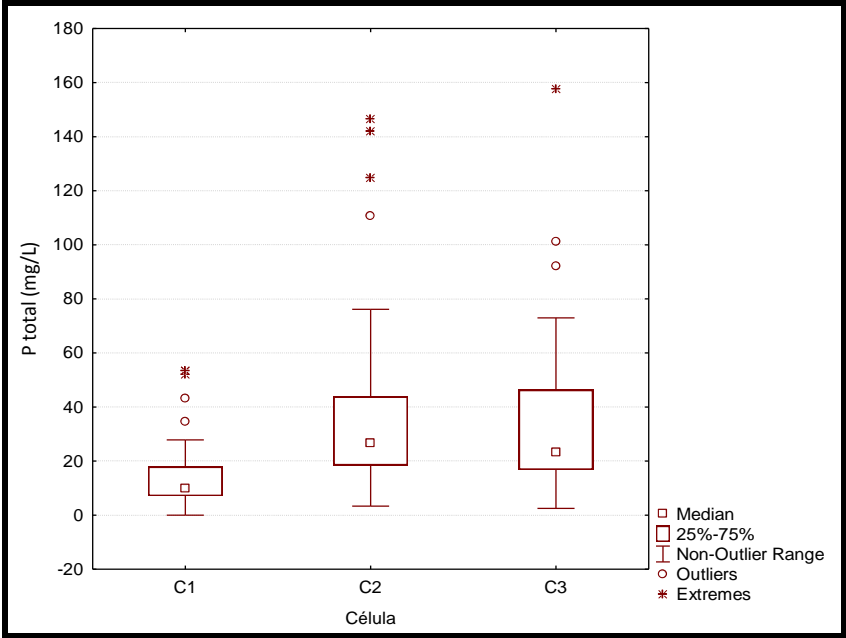


Fonte: Elaborado pela Autora

No 266º dia a concentração da variável atingiu 124,67 mg/L devido à influência da metodologia de coleta aplicada. Segundo Souto (2009), em dias menos chuvosos os valores de fósforo, geralmente aumentam.

O gráfico 19 apresenta os diagramas de caixas dos valores de P total nas células C1,C2 e C3.

Gráfico 19 - Box Plot de Fósforo Total nas células experimentais



Fonte: Elaborado pela Autora

Tabela 17 - Teste Tukey

Célula	C1	C2	C3
C1		-	0,000025
C2	0,000022	-	0,843194

Em cinzento os resultados que apontaram diferença significativa

Fonte: Elaborado pela Autora

O teste Tukey comprovou que o aumento da proporção de lodo na camada de cobertura da célula C3 não influenciou de forma significativa nas variações de fósforo total no lixiviado. Esperava-se que haveria diferença significativa entre as células C2 e C3, pois, quanto maior for a matéria orgânica, maior será o nível de fosfatos. (SOUTO, 2009).

6.9 INFLUÊNCIA DO LODO NA GERAÇÃO DE LIXIVIADO

A partir do 217º dia iniciou-se a medição do volume do lixiviado gerado em cada uma das células aterradas, já que estas possuem tubulação de saída de lixiviado com um registro. Porém, ao longo do experimento pouco lixiviado era produzido principalmente na célula C3(odo 30%). Além disso, em alguns dias não se conseguiu obter o líquido percolado em momentos da coleta, principalmente nas épocas de poucas precipitações

Assim, mudou-se a metodologia da coleta (registro aberto) que foi descrita no item 5.3. Do 259º ao 287º dia não saiu lixiviado na célula C3, mesmo usando outro procedimento de coleta.

A tabela 18 apresenta os dados obtidos do volume durante o monitoramento do lixiviado.

Tabela 18 - Volume (mL) de lixiviado gerado nas células experimentais

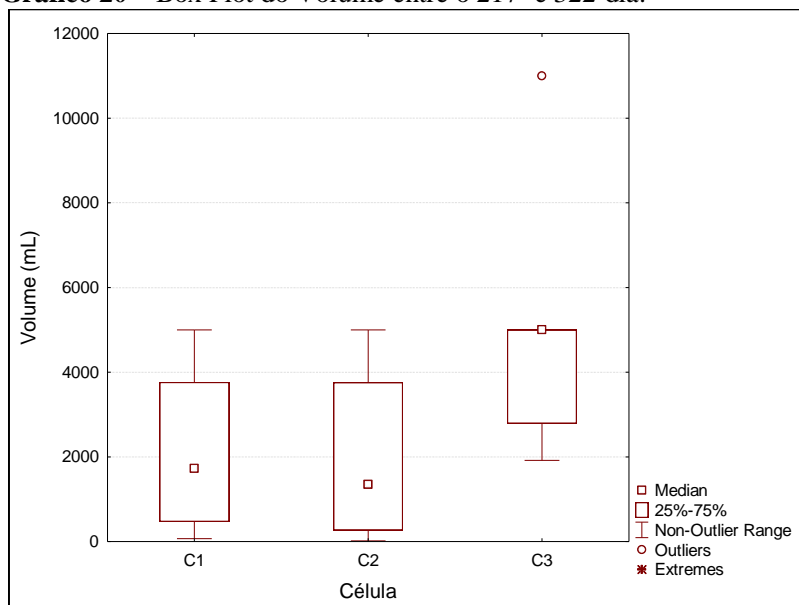
Tempo(dias)	C1	C2	C3	OBSERVAÇÃO
217	2530	2520	5000	
224	70	18	5000	
231	2240	690	2790	
238	1650	2000	4850	
245	1810	2330	11000	
252	102	113	1920	
259	-	-	-	NÃO HOUVE LIXIVIADO
266	1090	300	-	C3-SEM LIXIVIADO
273	570	420	-	C3-SEM LIXIVIADO
280	-	-	-	NÃO HOUVE LIXIVIADO
287	370	238	-	C3-SEM LIXIVIADO
294	5000	5000	2140	
301	5000	5000	5000	
308	-	-	-	NÃO HOUVE LIXIVIADO
315	-	-	-	NÃO HOUVE LIXIVIADO
322	5000	5000	5000	

Obs: Em cinza os dias em que foi usado o segundo procedimento de coleta (registro aberto)

Durante o período apresentado na tabela 18, as médias gerais das células C1, C2 e C3 foram :2119,33 mL; 1969,083 mg/L; 4744,44 mg/L.

A célula C3 apresentou maior volume de lixiviado, isto comprova que o material de cobertura aplicado na célula C3(lodo 30%), não possui alta capacidade de retenção dos líquidos percolados. Além disso, verificou-se nos testes geotécnicos realizados por PIMENTEL(2012) que o lodo usado na célula C3 possui granulometria similar a areia.

Gráfico 20 – Box Plot do Volume entre o 217º e 322º dia.



Fonte: Elaborado pela autora.

7 CONCLUSÃO

Avaliando-se os resultados obtidos do monitoramento do aterro experimental em escala piloto, as seguintes conclusões podem ser definidas:

- A célula C2 (solo:lodo 30%) apresentou maiores médias gerais de pH, alcalinidade, DQO, N- NO_2^- , N- NO_3^- , P, sólidos (ST,SV,SF), Cu e Zn. Isso pode ter ocorrido, devido à célula C3 possuir maior permeabilidade que a célula C2. A água que atravessa pela camada de cobertura (C3), possui menos tempo de contato com o lodo devido sua granulometria ser igual a de areia.
- O teor de matéria orgânica expressa em termos de DBO_5 na célula C3 (solo 30%) apresentou-se maior às células C1 e C2. Em dias de maior precipitação o parâmetro apresentou valores menores na mesma célula.
- A relação DBO_5/DQO das células C2 (Solo:lodo 30%) e C3(lodo 30%) apresentou-se baixa (próxima de 0,1) caracterizando as células de aterramento como aterros que se encontram na fase metanogênica. Além disso, a tendência de comportamento desse parâmetro é a diminuição progressiva ao longo do tempo de aterramento.
- A precipitação pluviométrica influenciou de forma significativa nas concentrações de P-total, DBO_5 .
- A célula C3 gerou maior quantidade de lixiviado entre o 217º e 322º dia do monitoramento devido à alta permeabilidade do lodo escolhido como material de cobertura.
- Os testes estatísticos comprovaram diferença significativa entre as células C2(solo+lodo 30%) e C3(lodo 30%) no teor de N- NH_3 , DBO_5 , DBO_5/DQO , alcalinidade e do pH. Isto indica que a diferença de percentual de lodo aplicado em camada de cobertura das células C2(50%) e C3(100%) influencia nos parâmetros citados.
- A utilização de lodo de esgoto caído e seco em estufa como material de cobertura é uma técnica que não influencia de forma adversa na qualidade do lixiviado, pois, apesar de o lodo aumentar a concentração de alguns parâmetros do lixiviado nos primeiros dias após sua aplicação, os valores tendem a baixar e a ficarem próximos de uma célula normal

(C1) e atendem aos limites preconizados pela legislação Brasileira.

8. RECOMENDAÇÕES

Em vista dos resultados obtidos, para estudos feitos nesta área, são feitas as seguintes recomendações:

- Verificar se os drenos que conduzem à saída do lixiviado das células C2(solo:lodo 30%) e C3 (lodo 30%) estão entupidos.
- Utilizar RSU frescos para verificar melhor a influencia das camadas de cobertura com lodo na decomposição dos resíduos.
- Investigar a biodegradabilidade do lixiviado através das relações AVT/DQO e STV/ST.
- Avaliar o comportamento hidráulico das células experimentais através da avaliação do balanço hídrico, comparando resultados teóricos e reais do volume de líquidos produzidos e armazenados no interior do aterro.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos – classificação, 2º ed. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 8419:** Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos – Procedimentos. São Paulo, 1992.

ALMEIDA, M. C. **Estudo do efeito dos elemntos residuais;** (Cr,Ni,Cu) no torneamento do Aço-de- corte-Fácil ABNT 12L14. 2005. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005.

ANDREOLI, C. V. et al. Proposição de plano de monitoramento da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no estado de Paraná. **SANEPAR**, v. 7, n. 7, p. 68-72, 1997.

ANDREOLI, C. V. **Lodo de esgoto:** Tratamento e Disposição final. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

_____. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: ABES, 2006.417 p.

_____. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V (coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2001. p.87-120.

APHA – American Public Health Associatio; AWWA – American Water Works Association; WPCF – Water Pollution Control Federation & WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21. ed. Washington: D.C., 2005.

BASSANI, Fabiana. **Monitoramento do lixiviado do aterro controlado de Maringá, Paraná, e avaliação da tratabilidade com coagulantes naturais, radiação ultravioleta (UV) e ozônio.** 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá 2010.

BUDA, J. F. **Segurança e higiene no trabalho em estação de tratamento de esgoto**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 92, 16 de maio de 2011. Seção 1, p. 89.

CAMARGO, O. A. Disposição de lodo de esgoto em solo agrícola: instrumental para o pensamento. In: BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Octavio Antonio de (org). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna, SP. 2006, v.1, p.37-45.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Petrópolis: PROSAB, 2006. 494 p.

CASTILHOS JÚNIOR. et al. **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos Para Pequenas Comunidades**. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2002.

_____. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JR, A. B. (org). **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades**. Rio de Janeiro: Rima, ABES, 2003. p. 19-50.

CATAPRETA, Cícero Antonio Antunes. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008. 316 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais-Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2008.

CHUNG, B. H. I.; YU, J.; LEE, Y. S. Utilization of Stabilized and Solidified Sewage Sludge as Daily Landfill Cover Material. **KSCE Journal of Civil Engineering**. v. 10, n. 4, p. 255-258. jul. 2006.

COMPANHIA DE MELHORAMENTO DA CAPITAL. RESUD.
Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis.
 Florianópolis: COMCAP, 2002.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P. Landfill emissions and environmental impact: An introduction. In SARDINIA '95, **Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, Cagliari**. Italy: Ed. CISA, 1995.

D'ALMEIDA, M. L. O; VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS - DMAE.
Normas gerais para ensaios. Divisão de Pesquisa do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre. Porto Alegre, 1978.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2001. p. 29-55.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características do biossólido. In: LARA, A. I.; FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; IHLENFELD, R. G. K. **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura**. Curitiba: PROSAB, 1999.

FERREIRA, Adriana Gonçalves. **Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitário de São Carlos-SP por meio da caracterização físico-química**. 2010. 252 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FERREIRA, M. A. da S; MAHLER, C. F. Avaliação do solo das camadas de coberturas intermediárias e finais: Estudo de Caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba, v.3, p. 1377-1382.

FRANCESCHET, M. et al. Estudo dos solos utilizados para a impermeabilização da camada de base e de cobertura de aterros sanitários de Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. **Anais ...** Campo Grande: ABES, 2005. p.1-6.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (coord.). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p.51-105.

GOMES, L. P.; MORAES, C. A. M.; BOFF, R. D. Emprego de areia usada de fundição em coberturas intermediária e final de aterros sanitários de RSU. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 71-76, abr./jun., 2007.

GOMES, T. L. **Avaliação quali-quantitativa do percolado gerado no aterro controlado de Santa Maria-RS. Dissertação** 2005 (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GONÇALVES, R. F. Desidratação de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (coord). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p.57-86.

GONÇALVES, R. F; LUDUVICE, M; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Princípios de tratamento biológico de águas residuárias: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: FCO, 2001.

GRIFFIN, R. A. et al. Municipal Sewage Sludge Management at Dedicated Land Disposal Sites and Landfills. In: LUE-HING, C. et al. (comp.). **Water Quality Management Library – Volume 4: Municipal Sewage Sludge Management: A Reference text on Processing, Utilization and Disposal**. 2. ed. Lancaster: Technomic Publishing Company Book, 1998. cap. 7, p. 409-486.

HAANDEL, A. C. Vahn; ALÉM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Abes, 2006. cap. 2, p. 7-28.

HAIR, J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

IBGE – **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso: maio 2012.

INGUNZA, M. P. D. Uso de resíduos do saneamento na fabricação da cerâmica vermelha. In ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 283-359.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 2. ed. São Paulo: IPT, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro. ABES, 1995.

JUCÁ, J. F. T. Destinação final de resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., 2002, Braga, Portugal. **Anais...** Portugal: Associação Portuguesa para Estudos de Saneamento Básico, 2002. Disponível em: <www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/destina10.pdf>. Acesso em: 25. Mar. 2012.

LANGE, L. C. Processos Construtivos de Aterros Sanitários: Ênfase no Estudo de Camadas de Cobertura como Mecanismo de Controle da Geração de Lixiviado. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (coord.). **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Petrópolis - RJ: PROSAB, 2006. cap. 4, p.109–208.

LEBLANC, R. J.; MATTEHWS, P.; RICHARD, R. P. **Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource**.

Disponível em:

<http://esa.un.org/isy/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf>. Acesso em: 19 out. 2011.

LEITE, W. C. A. **Estudo do comportamento da temperatura pH e teor de umidade na decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários**. São Carlos. 1991. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

LESSA, G. T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização do lodo da estação de tratamento biológico de esgoto misto na construção civil**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. 2010. 284 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAGALHÃES, A.F. **Avaliação do desempenho de técnicas de bioengenharia na proteção e conservação da cobertura final de taludes em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos: Estudo de Caso para Aterro Sanitário de Belo Horizonte**. Belo Horizonte. 2005. 169 f. Dissertação (mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MANZOCHI, Clarice Ilse Schwarz. **Logística para tratamento e disposição final de lodos de ETE'S visando reciclagem agrícola**. 2008. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis , 2008.

MARTINS, A. L. C. et al. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v.27, p.563-574, 2003.

MEDEIROS, P. A. et al. Geração de líquidos percolados em resíduos urbanos com cobertura permeável. In: VI SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...** Vitória: ABES, 2002.

MELO, J. T.; GUIMARÃES, D. P. **Efeito do lodo de esgoto, do calcário e de nutrientes minerais sobre o crescimento de angico.** Planaltina,DF. Embrapa, 2002. 17 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 56).

METCALF, B.; EDDY, I. N. C. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse.** 3. ed. New York: McGraw-Hill. 1991.

MIKI, Marcelo Kenji. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas.** 1998. 405 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.São Paulo,1998.

MIKI, Marcelo Kenji; ALÉM SOBRINHO, Pedro; VAN HAANDEL, Anadrianus C. Tratamento da fase Sólida em Estações de tratamento de Esgotos – Condicionamento, Desaguamento Mecanizado e Secagem Térmica do Lodo. In: ANDREOLI, C. V (coord.). **Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento** – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PESSIN, N. et al. Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: CASTILHOS JR, A. B; et al. (org.) **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades.** Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2002. p. 13-17.

PIMENTEL, Francisco José Guedes. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário.** 2012. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC, 2012.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto sanitário como material de cobertura de aterro sanitário.** 2011. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

QUISSINI, Carina Soldera. **Aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de**

aterro sanitário. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais)- Universidade de Caxias do sul, Caxias do sul, 2009.

RANGEL, O. J. P. et al. **Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho.** 2006, v. 30, p. 583-594.

REICHERT, G. A. **(Manual) Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários.** , 2007. 109 p.

REICHERT, G.A.; Dos Anjos, I. Aterro Sanitário da Extrema de Porto Alegre: concepção de projeto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES: 1997

RHEW, R. D.; BARLAZ, M. A. Effect of Lime-Stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition. **Journal of environmental engineering.** North Carolina State University – USA. v. 121, n. 7, p. 499-506, 1995.

RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla S. Ten. **Projeto de Experimentos.** 2011. Monográfica (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RIZZO, R. P.; LOLLO, J. A. Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. **Revista Engenharia sanitária e ambiental**, v. 2, p.250-259, 2006.

ROSARIO, C. G. A. **Avaliação da disposição de lodo gerado numa estação de tratamento de água em reator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo (UASB).** 2009. 236 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANEPAR-COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Manual Técnico para Utilização Agrícola do Lodo de Esgoto.** Curitiba, 1997.

SILVEIRA, Diego Altieri. **Pré-tratamento do excesso de lodo ativado visando posterior estabilização anaeróbia:** Estudo de caso: Efluente

da produção de gelatina. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SOUTO, G. D. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros:** estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“*stripping*”). 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SOUTO, G.B.; POVINELLI, J. 2007. Características do Lixiviado de Aterros Sanitários no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007. 10 p.

TEIXEIRA, C. E. Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife. **Anais...** Recife: ABES, 2009. p. 99-108.

TEIXEIRA, P. F. **Investigação sobre Características Geotécnicas de um Resíduo de Papel.** 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

TRENNEPOHL, Felipe Gustavo. **Remoção biológica de nitrogênio em lixiviado de aterro de resíduos, em sistema piloto de lodos ativados com fonte externa de carbono.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

APÊNDICE(S)

Apêndice A - Dados das células experimentais

Data coleta	pH			DQO			DBO			NH3		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
27/06/11	6,71	7,17	7,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04/07/11	6,60	7,50	7,16	429,3	3867,1	1628,1	64	166	162	2,57	72,10	44,37
11/07/11	6,72	7,26	6,83	347,5	3246,2	214,6	63	97	101	5,35	17,75	33,73
18/07/11	6,51	7,38	7,06	454,4	2775,3	177,7	54	147	32	1,93	64,47	69,30
25/07/11	6,48	7,38	7,02	735,5	1847,5	1078,5	79	64	75	0,73	26,20	58,90
01/08/11	6,60	7,59	7,13	147,0	994,5	986,8	56	74	173	1,83	11,55	66,13
08/08/11	6,10	6,98	6,52	397,9	451,5	805,0	34	46	187	5,00	6,73	56,53
15/08/11	6,57	7,55	6,99	96,1	220,2	696,5	23	-	175	0,00	0,00	53,43
22/08/11	6,58	7,90	7,09	38,1	230,5	845,7	-	-	100	3,40	7,67	57,43
29/08/11	6,51	7,70	7,20	341,6	529,6	776,5	2	16	54	5,10	9,60	66,53
05/09/11	6,65	7,97	7,12	448,2	900,4	1049,6	-	-	-	2,90	9,60	37,40
12/09/11	6,70	7,84	7,10	462,5	803,7	933,0	26	32		9,60	10,93	32,80
19/09/11	6,44	7,77	7,01	369,7	451,2	345,1	-	42	50	1,13	3,80	10,40
26/09/11	6,69	7,63	6,97	248,7	584,8	827,8	54	24	70	3,57	5,87	24,37
03/10/11	6,58	7,83	6,85	618,4	566,7	309,7	32	11	40	1,08	3,56	7,52
10/10/11	6,69	7,80	6,75	451,9	592,7	213,0	20	32	82	1,42	2,73	5,13
17/10/11	6,46	7,35	6,83	224,1	419,3	581,9	51	31	54	2,71	6,58	6,73
24/10/11	6,53	7,31	6,94	133,7	422,1	575,7	15	20	2	2,63	7,35	12,13
31/10/11	6,81	7,53	6,92	225,0	306,9	305,0	-	-	-	3,63	0,12	4,33
07/11/11	6,69	8,00	6,92	189,2	369,5	542,6	-	-	-	2,30	2,61	8,16
14/11/11	6,72	7,89	6,95	153,4	432,1	780,2	50	26	82	0,98	5,10	11,98
21/11/11	6,80	7,31	6,94	193,0	565,3	587,1	54	24	70	2,60	1,79	1,96
28/11/11	6,72	7,89	6,77	188,8	334,1	404,8	-	-	-	1,21	5,23	4,38
05/12/11												
12/12/11												
19/12/11												
26/12/11												
02/01/11												
09/01/12												
16/01/12												
23/01/12												
30/01/12	6,95	7,68	7,94	302,23	193,39	475,21	49	35	29	5,10	5,31	9,10
6/02/12	6,43	7,52	7,29	376,06	314,75	589,47	-	-	-	2,60	3,48	5,37
13/02/12	6,78	7,64	7,13	404,5	335,03	530,93	54	22	56	1,92	9,75	6,98
20/02/12	6,49	7,46	7,01	610,25	668,42	643,16	50	8	64	0,77	4,520	4,56
27/02/12	6,5	7,19	7,05	299,11	1277,1	622,83	22	80	34	4,3	3,333	16,83
05/03/12	6,15	7,63	7,1	475,66	613,75	1427,25	42	10	48	4,42	1,42	2,58

12/03/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/03/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26/03/12	6,79	7,86		85,3	283,92	-	36	28		2,26	8,9	-
2/04/12	6,87	8	-	183	488,5	-	10	14	-	1,5	7,5	-
9/04/2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16/04/12	6,74	7,4	-	362,25	451,08	-	-	-	-	2,53	9,53	-
23/04/12	6,91	7,81	7,85	85,96	483,46	1686,33	4	12		1,76	7,733	25,36
30/04/12	7,38	7,92	7,69	163,9	349,2	1770	16	58	28	2,22	10,42	38,33
7/05/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14/05/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21/05/12	6,97	7,65	7,71	627,4	726,66	1724,5	8	24	30	1,92	2,92	6,75

Obs: Espaços em branco, dias sem monitoramento

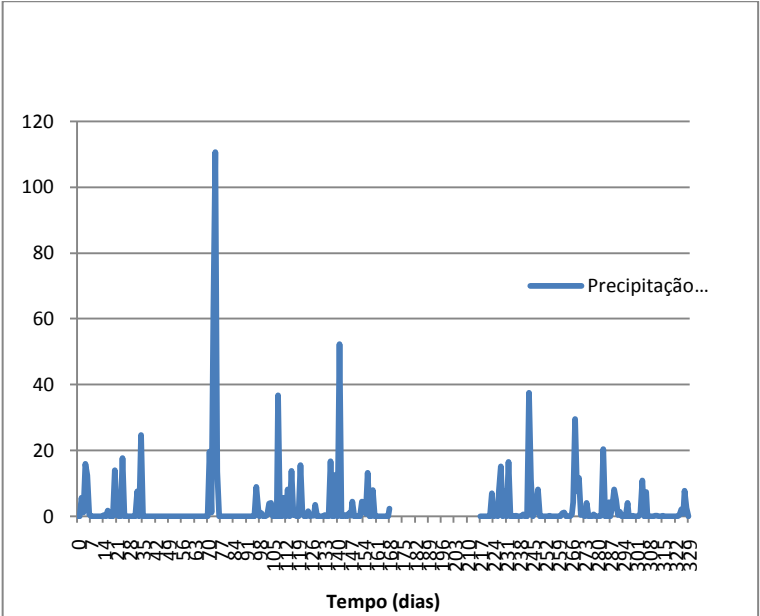
....

Apêndice B - Médias das células experimentais

[illegible]

26/12/11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02/01/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09/01/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16/01/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23/01/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30/01/12	21,4	25,54	24,5	16,6	58,3	67,2	10,3	13,68	5,02	0,27	0,06	0,5 5
6/02/12	13,3	19,15	19,4	-	-	48,1	12,8	12,29	1,98	0,09	1,67	0,0 7
13/02/12	7,75	18,5	25,1	11,5		41,3	76,8	95,33	150	0,00 4	1,33	0,4
20/02/12	14	48,33	50,5	11,9	25,2	70,1	84,6	97,83	92	0,02	0,11	0,1 4
27/02/12	4,3	3,33	16,8	15,1	28,85	-	87,3	41,16	54,7	0,2	0,13	0,3
05/03/12	18,1	43,83	55	-	44,95	59,6	60,7	41,08	35,4 1	3,5	1	0,2 5
12/03/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/03/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26/03/12	43,1 6	124,6	-	10,8 5	26,75	-	72,6	68,91	41,1 6	0,03	0,27	-
2/04/12	27,8	41,5	-	3,95	27,35	-	29,6	63,66	-	2,29	10,2	-
9/04/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16/04/12	17,9	39,36	-	5,15	29,9	-	2,16	0,75	-	0,07	0,84	-
23/04/12	3,1	35,76	92,1	11,9	37,1	52,1	25,6	34,06	40,6 3	0,12	0,09	0,9 2
30/04/12	17,0 8	43	101	7	47,5	102	26,7	43,76	56,8	0,09	0,02	1,7 3
7/05/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14/05/12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21/05/12	3	14,75	65,3	6,5	28,5	81	31,2	60,5	103, 5	0,09	0,19	9,3 2

Apêndice C - Dados Pluviométricos diários



Fonte: Arquivos da Autora